



**André Filipe Guinapo Cabreirinha**

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

## **Análise da Influência dos Parâmetros de Pressurização nas Características Dimensionais e Mecânicas de Peças Termoplásticas para a Indústria Automóvel**

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientadora: Professora Doutora Carla Maria Moreira Machado, Professora Auxiliar, Universidade Nova de Lisboa

Co-Orientadora: Professora Doutora Ana Sofia Leonardo Vilela de Matos, Professora Auxiliar, Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Catarina Isabel Silva Vidal

Arguente: Prof. Doutor António Gabriel Marques Duarte dos Santos

Vogal: Prof. Doutora Carla Maria Moreira Machado



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Junho 2019**



**Análise da influência dos parâmetros de pressurização nas características dimensionais e mecânicas de peças termoplásticas para a indústria automóvel**

**Copyright © 2019 André Filipe Guinapo Cabreirinha**

**Faculdade de Ciências e Tecnologia e Universidade Nova de Lisboa**

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



*Aos meus pais e irmão*



## Agradecimentos

---

Esta dissertação não teria sido possível de completar sem a contribuição, direta ou indireta, de inúmeras pessoas. Assim, gostaria de deixar uma mensagem de apreço a todos aqueles que me acompanharam e sem os quais o meu esforço para completar este trabalho teria sido insuficiente. Em particular:

À minha orientadora, Professora Carla Machado, gostaria de agradecer, em primeiro lugar, pela sua preciosa orientação ao longo deste trabalho. Gostaria ainda de agradecer por toda a sua disponibilidade, paciência, preocupação e compreensão demonstradas ao longo deste período, que foram fundamentais para o sucesso desta dissertação.

À minha co-orientadora, Professora Ana Sofia de Matos, pela transmissão de conhecimentos referente a métodos estatísticos, que foram fulcrais nesta dissertação e ainda pela sua amabilidade.

Ao Eng. José Miguel Araújo, que tão bem me recebeu na Delphi Seixal, e por toda a partilha de informação e conhecimento, mesmo quando a sua disponibilidade era reduzida.

A todos os engenheiros colaboradores na área de injeção de plásticos da Delphi Seixal, que acompanharam toda a fase de preparação do molde, bem como a implementação do Desenho de Experiências e que de alguma forma contribuíram para a conclusão deste trabalho. Deixo também uma palavra de agradecimento aos restantes operadores, técnicos e treinadores que me auxiliaram durante a realização da componente experimental desta dissertação.

Ao Luís André Marques, o meu muito obrigado por toda a amizade e companheirismo demonstrados, quer ao longo da elaboração desta dissertação, quer durante os restantes anos de curso. Sem a sua ajuda nada disto teria sido possível.

Aos meus restantes colegas de curso, com quem vivi grandes momentos e que em parte ajudaram a definir quem sou hoje. Os importantes sabem quem são.

Aos meus amigos de Sines que me acompanham nos bons e nos maus momentos desde a minha infância, por todas as palavras de motivação que foram indispensáveis para ter conseguido alcançar este objetivo.

Por fim, quero agradecer a toda a minha família, em especial aos meus pais e irmão, por terem sempre acreditado em mim e dado força e motivação, tanto nos bons como nos maus momentos, respeitando todas as minhas decisões.





Dada a grande pressão competitiva existente nos dias de hoje, que obriga as empresas a terem de obter produtos segundo os requisitos de qualidade exigidos por parte dos clientes, a um custo final competitivo, torna-se crucial a utilização de métodos estatísticos como ferramentas para análise e controlo de processos produtivos. Na indústria automóvel, em particular, nas empresas produtoras de equipamentos elétricos e eletrónicos para essa indústria, a utilização desses métodos torna-se absolutamente indispensável para antecipar falhas e defeitos na produção.

O processo de moldação por injeção é um dos mais significativos métodos de processamento de materiais poliméricos. A grande procura e utilização, a nível global, de peças provenientes do processo de moldação por injeção traz consigo a necessidade de controlar todas as fases do processo, de modo a que se garanta uma constante qualidade e fiabilidade dos produtos obtidos. A fase de pressurização é a etapa do processo que tem maior relevância na estabilidade dimensional das peças e na definição da sua massa. Como tal, uma correta utilização dos valores de processo associados a esta fase é fundamental para a obtenção das características funcionais desejáveis para as peças moldadas.

Este trabalho foi realizado em parceria com a empresa Delphi Technologies, empresa líder na produção de componentes eletrónicos para a indústria automóvel. Com este estudo pretendeu-se analisar a influência dos parâmetros de pressurização nas características dimensionais e mecânicas de peças termoplásticas obtidas para a indústria automóvel. Com este estudo pretendeu-se também mostrar que a Metodologia de Superfície de Resposta e a Razão Sinal-Ruído tratam-se de ferramentas estatísticas importantes para o estudo dos efeitos dos parâmetros de pressurização nas características dimensionais e mecânicas consideradas.

A aplicação da Metodologia de Superfície de Resposta demonstrou-se eficaz para realização da análise da influência dos parâmetros de pressurização nas características dimensionais e mecânicas de peças termoplásticas para a indústria automóvel. Os resultados foram satisfatórios, o que sugere que a aplicação destas técnicas estatísticas é promissora para a análise de futuros moldes de injeção utilizados na empresa.

**Palavras-chave:** Moldação por injeção; Pressurização; Desenho de Experiências; Metodologia de Superfície de Resposta



Given the great competitive pressure that nowadays exists, which forces companies to obtain products according to the quality requirements demanded by the customers, at a competitive final cost, it becomes crucial to use statistical methods as tools for analysis and control of productive processes. In the automotive industry, particularly in the companies producing electrical and electronic devices for this industry, the use of these methods becomes absolutely indispensable to anticipate failures and defects in production.

The injection molding process is one of the most significant methods of processing polymeric materials. Globally, the great demand and use of parts from the injection molding process brings with it the need to control all phases of the process in order to guarantee a constant quality and reliability of the products obtained. The pressurization phase is the stage of the process that has greater relevance in the dimensional stability of the parts and in the definition of their mass. As such, a correct use of the process values associated with this phase is critical for obtaining the desired functional characteristics for the molded parts.

This work was carried out in partnership with Delphi Technologies, a leader company in the production of electronic components for the automotive industry. This study aimed to analyze the influence of pressurization parameters on the dimensional and mechanical characteristics of thermoplastic parts obtained for the automotive industry. The aim of this study was to show that the Response Surface Methodology and the Signal-to-Noise Ratio are important statistical tools for the study of the effects of pressurization parameters on the dimensional and mechanical characteristics considered.

Application of the response surface methodology has been shown to be effective to perform the analysis of the influence of pressurization parameters on the dimensional and mechanical characteristics of thermoplastic parts for the automotive industry. The results obtained were satisfactory, which suggests that the application of these statistical techniques is promising for the analysis of future injection molds used in the company.

**Keywords:** Injection molding; Pressurization; Design of Experiments; Response Surface Methodology



<b>1 Introdução, Objetivos e Estrutura .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Enquadramento do trabalho na empresa Delphi Technologies .....</b>	<b>2</b>
1.2.1 Bobinas de ignição .....	3
<b>1.3 Motivação e Objetivos .....</b>	<b>5</b>
<b>1.4 Estrutura da Dissertação .....</b>	<b>7</b>
<b>2 Revisão do Estado da Arte .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1 Processamento de plásticos .....</b>	<b>9</b>
2.1.1 O Processo de Moldação por Injeção .....	11
<b>2.2 Ciclo de moldação .....</b>	<b>13</b>
2.2.1 Fase 1 – Fecho e trancamento do molde .....	13
2.2.2 Fase 2 – Injeção .....	14
2.2.3 Fase 3 – Pressurização .....	15
2.2.4 Fase 4 – Arrefecimento e plasticização .....	16
2.2.5 Fase 5 – Abertura e extração .....	17
2.2.6 Fase 6 – Tempo de pausa (Tempo morto) .....	18
<b>2.3 Alimentadores .....</b>	<b>19</b>
<b>2.4 Desumidificadores .....</b>	<b>21</b>
2.4.1 Parâmetros de Secagem .....	22
<b>2.5 Controladores de temperatura .....</b>	<b>23</b>
<b>3 Metodologias e Procedimento Experimental .....</b>	<b>25</b>
<b>3.1 Bill of Process .....</b>	<b>25</b>
<b>3.2 Folhas de Setup .....</b>	<b>26</b>
<b>3.3 Equipamento e material utilizado .....</b>	<b>28</b>
3.3.1 Máquina injetora .....	28
3.3.2 Molde de injeção .....	29
3.3.3 Material .....	30
<b>3.4 Preparação do Molde .....</b>	<b>32</b>
3.4.1 Estudo reológico – Teste de viscosidade .....	35
3.4.2 Estudo do balanceamento de cavidades .....	38
3.4.3 Estudo da queda de pressão .....	40
3.4.4 Estudo da janela de processo .....	43
3.4.5 Estudo da solidificação do ponto de injeção .....	45

3.4.6	Estudo do tempo de arrefecimento .....	47
<b>3.5</b>	<b>Desenho de Experiências (DOE) e Metodologia da Superfície de Resposta (RSM).....</b>	<b>48</b>
3.5.1	Planeamento de experiências para ajuste de modelos de segunda ordem.....	52
3.5.2	Análise de variância, teste de hipóteses e adequabilidade do modelo .....	56
3.5.3	Razão Sinal-Ruído ( <i>S/N Ratio</i> ).....	58
<b>3.6</b>	<b>Máquina de medição por coordenadas .....</b>	<b>60</b>
<b>3.7</b>	<b>Teste de resistência mecânica (<i>Ball Test</i>).....</b>	<b>62</b>
<b>4</b>	<b>Apresentação e Discussão de Resultados .....</b>	<b>67</b>
4.1	Resultados da preparação do molde .....	67
4.2	Resultados da análise da Razão Sinal-Ruído .....	69
4.3	Resultados da Metodologia de Superfície de Resposta.....	73
<b>5</b>	<b>Conclusões e Trabalho Futuro .....</b>	<b>97</b>
5.1	Conclusões e contribuições .....	97
5.2	Sugestões para trabalhos futuros .....	98

## Índice de Figuras

---

Figura 1.1 – Esquematisação do princípio de funcionamento de uma bobina de ignição .....	4
Figura 1.2 – Evolução dos tipos de bobinas de ignição utilizadas .....	4
Figura 1.3 – Bobina de ignição do tipo <i>pencil coil</i> : a) configuração externa; b) configuração interna .....	5
Figura 2.1 – Consumo mundial de plásticos por processo industrial .....	10
Figura 2.2 – Rotina de transformação de termoplásticos em moldação por injeção .....	12
Figura 2.3 – Fecho e trancamento do molde de injeção .....	14
Figura 2.4 – Enchimento do molde de injeção .....	15
Figura 2.5 – Aplicação da pós-pressão .....	16
Figura 2.6 – Arrefecimento e plasticização de material polimérico .....	17
Figura 2.7 – Abertura do molde e extração das moldações .....	18
Figura 2.8 – Ciclo de moldação .....	18
Figura 2.9 – Sistema de alimentação que utiliza um aspirador elétrico .....	20
Figura 2.10 – Esquematisação de um sistema centralizado de alimentação de material .....	20
Figura 2.11 – Sistema de secagem que utiliza bandas dissecantes .....	22
Figura 2.12 – Exemplo de termorregulador e respetivos parâmetros de processo registados .....	24
Figura 3.1 – Equipamentos de injeção: a) Máquina injetora ENGEL VC 330/120 Tech; .....	28
Figura 3.2 – Equipamentos auxiliares de moldação: a) alimentador e desumidificador; .....	29
Figura 3.3 – <i>Cases</i> extraídas do molde após um ciclo: em baixo, da cavidade 12; em cima, da cavidade 13 .....	30
Figura 3.4 – Molde de injeção N55 Case#6 PLT 461: a) aberto; b) fechado .....	30
Figura 3.5 – Material utilizado para moldação de <i>Cases</i> N55 .....	31
Figura 3.6 – Enquadramento da moldação científica no processamento de material polimérico ....	33
Figura 3.7 – Fluxograma ilustrativo do procedimento de preparação do molde N55 Case#6 PLT 461 .....	34
Figura 3.8 – Analisador de humidade METTLER TOLEDO Excellence Plus HX204 .....	35

Figura 3.9 – Peças obtidas após a realização do estudo reológico e respetiva progressão do enchimento das mesmas com o aumento da velocidade de injeção .....	36
Figura 3.10 – Curva reológica do molde N55 Case#6 PLT 461 .....	37
Figura 3.11 – <i>Cases</i> obtidas do estudo do balanceamento de cavidades para cada taxa de enchimento .....	38
Figura 3.12 – Gráfico do estudo do balanceamento de cavidades.....	40
Figura 3.13 – Peças obtidas do estudo da queda de pressão.....	41
Figura 3.14 – Perfil de queda de pressão do molde N55 Case#6 PLT 461 .....	42
Figura 3.15 – Janela de processo cosmética do molde N55 Case#6 PLT 461 .....	45
Figura 3.16 – Gráfico massa das peças em função do tempo de pós- pressão .....	46
Figura 3.17 – Modelo geral de um processo produtivo.....	49
Figura 3.18 – Planeamento composto central circunscrito para $k=2$ .....	54
Figura 3.19 – Medição das coordenadas das peças do <i>DOE</i> : a) <i>CMM</i> Zeiss Eclipse 700; b) Equipamentos de medição; c) Medição das dimensões no interior e no exterior da peça; d) <i>Software</i> Zeiss <i>Calypso</i> 4.6.4 .....	61
Figura 3.20 – Balança analítica utilizada .....	62
Figura 3.21 – Teste de resistência mecânica ( <i>Ball Test</i> ) .....	64
Figura 3.22 – Gráfico Força vs Deslocamento relativo à 2ª réplica da 12ª experiência, obtida da cavidade 13: a) gerado pelo <i>software</i> Zwick Roell <i>testXpert® V12.3 Master</i> ; b) gerado pelo programa criado em <i>MATLAB</i> .....	65
Figura 3.23 – Identificação da localização da rotura nas peças: a) da cavidade 12; b) da cavidade 13 .....	65
Figura 4.1 – Gráfico de injeção referente ao molde N55 Case#6 PLT 461.....	69
Figura 4.2 - Fatores de Controlo S/N – $F_b$ (Cavidade 12).....	71
Figura 4.3 - Fatores de Controlo S/N – $F_b$ (Cavidade 13).....	71
Figura 4.4 - Fatores de Controlo para médias – $F_b$ (Cavidade 12) .....	72
Figura 4.5 - Fatores de Controlo para médias – $F_b$ (Cavidade 13) .....	72
Figura 4.6 – Superfície de resposta ajustada de: a) $F_b = f(t,P)$ ; b) $F_{máx} = f(t,P)$ ; c) $W = f(t,P)$ ...	74
Figura 4.7 – Superfície de resposta ajustada de $S_b = f(t,P)$ .....	75



Figura 4.8 – Teste de normalidade dos resíduos de Sb: a) histograma de resíduos; b) gráfico de probabilidade normal dos resíduos.....	76
Figura 4.9 – Análise dos resíduos de Sb face: a) aos valores previstos pelo modelo ajustado; b) aos valores observados nas experiências .....	76
Figura 4.10 – Superfície de resposta ajustada de KPC 1 = f (t,P) .....	77
Figura 4.11 – Teste de normalidade dos resíduos de KPC 1: a) histograma de resíduos; b) gráfico de probabilidade normal dos resíduos.....	78
Figura 4.12 – Análise dos resíduos de KPC 1 face: a) aos valores previstos pelo modelo ajustado; b) aos valores observados nas experiências.....	78
Figura 4.13 – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para a resposta KPC 1 .....	78
Figura 4.14 – Superfície de resposta ajustada de QCI 3 = f (t,P) .....	80
Figura 4.15 – Teste de normalidade dos resíduos de QCI 3: a) histograma de resíduos; b) gráfico de probabilidade normal dos resíduos.....	81
Figura 4.16 – Análise dos resíduos de QCI 3 face: a) aos valores previstos pelo modelo ajustado; b) aos valores observados nas experiências.....	81
Figura 4.17 – Superfície de resposta ajustada de QCI 4 = f (t,P) .....	82
Figura 4.18 – Teste de normalidade dos resíduos de QCI 4: a) histograma de resíduos; b) gráfico de probabilidade normal dos resíduos.....	83
Figura 4.19 – Análise dos resíduos de QCI 4 face: a) aos valores previstos pelo modelo ajustado; b) aos valores observados nas experiências.....	83
Figura 4.20 – Superfície de resposta ajustada de QCI 6 = f (t,P) .....	84
Figura 4.21 – Teste de normalidade dos resíduos de QCI 6: a) histograma de resíduos; b) gráfico de probabilidade normal dos resíduos.....	85
Figura 4.22 – Análise dos resíduos de QCI 6 face: a) aos valores previstos pelo modelo ajustado; b) aos valores observados nas experiências.....	85
Figura 4.23 – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para a resposta QCI 6 .....	85
Figura 4.24 – Superfície de resposta ajustada de QCI 11 = f (t,P) .....	87
Figura 4.25 – Teste de normalidade dos resíduos de QCI 11: a) histograma de resíduos; b) gráfico de probabilidade normal dos resíduos.....	88

Figura 4.26 – Análise dos resíduos de QCI 11 face: a) aos valores previstos pelo modelo ajustado; b) aos valores observados nas experiências.....	88
Figura 4.27 – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para a resposta QCI 11 .....	88
Figura 4.28 – Superfície de resposta ajustada de QCI 12 = $f(t,P)$ .....	90
Figura 4.29 – Teste de normalidade dos resíduos de QCI 12: a) histograma de resíduos; b) gráfico de probabilidade normal dos resíduos.....	91
Figura 4.30 – Análise dos resíduos de QCI 12 face: a) aos valores previstos pelo modelo ajustado; b) aos valores observados nas experiências.....	91
Figura 4.31 – Superfície de resposta ajustada de QCI 10 = $f(t,P)$ .....	93
Figura 4.32 – Teste de normalidade dos resíduos de QCI 10: a) histograma de resíduos; b) gráfico de probabilidade normal dos resíduos.....	93
Figura 4.33 – Análise dos resíduos de QCI 10 face: a) aos valores previstos pelo modelo ajustado; b) aos valores observados nas experiências.....	93
Figura 4.34 – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para a resposta QCI 10 .....	94

## Índice de Tabelas

---

Tabela 2.1 – Principais características do processo de moldação por injeção .....	11
Tabela 3.1 – Dados registados do teste de viscosidade .....	37
Tabela 3.2 – Diferença de massa entre cavidades para taxas de enchimento de 25% e 50% .....	39
Tabela 3.3 - Diferença de massa entre cavidades para taxas de enchimento de 75% e <i>end of fill</i> (EOF) .....	39
Tabela 3.4 – Média da massa das peças estudadas e respetivas diferenças entre cavidades .....	39
Tabela 3.5 – Dados obtidos do estudo da queda de pressão .....	42
Tabela 3.6 – Quedas de pressão obtidas para cada secção de análise .....	43
Tabela 3.7 – Dados obtidos do estudo da janela de processo .....	44
Tabela 3.8 – Dados obtidos do estudo da solidificação dos pontos de injeção .....	46
Tabela 3.9 – Procedimento para a realização de um DOE .....	49
Tabela 3.10 – Valores a serem usados para os fatores de pressurização em cada um dos cinco níveis .....	55
Tabela 3.11 – Planeamento de experiências .....	55
Tabela 3.12 – Tabela de análise de variância para um modelo ajustado de regressão linear múltipla .....	56
Tabela 4.1 – Resultados obtidos do estudo dos 6 passos .....	68
Tabela 4.2 - Tabela de Resposta para Razões Sinal-Ruído - $F_b$ (Cavidade 12) .....	70
Tabela 4.3 - Tabela de Resposta para Razões Sinal-Ruído - $F_b$ (Cavidade 13) .....	70
Tabela 4.4 – Melhores níveis dos fatores – Análise das Respostas Médias S/N .....	71
Tabela 4.5 – Tabela de Resposta para médias - $F_b$ (Cavidade 12) .....	72
Tabela 4.6 - Tabela de Resposta para médias - $F_b$ (Cavidade 13) .....	72
Tabela 4.7 – Melhores níveis dos fatores – Análise das Respostas Médias .....	73
Tabela 4.8 – Tabela de análise de variância para testar a adequação do modelo de <b>Sb</b> .....	75
Tabela 4.9 – Tabela de análise de variância para testar a adequação do modelo de KPC 1 .....	77
Tabela 4.10 – Tabela de análise de variância para testar a adequação do modelo de QCI 3 .....	80

Tabela 4.11 – Tabela de análise de variância para testar a adequação do modelo de QCI 4 .....	82
Tabela 4.12 – Tabela de análise de variância para testar a adequação do modelo de QCI 6 .....	84
Tabela 4.13 – Tabela de análise de variância para testar a adequação do modelo de QCI 11 .....	87
Tabela 4.14 – Tabela de análise de variância para testar a adequação do modelo de QCI 12 .....	90
Tabela 4.15 – Tabela de análise de variância para testar a adequação do modelo de QCI 10 .....	92
Tabela 4.16 – Resumo dos fatores significativos e respectivos efeitos para cada resposta .....	95
Tabela 4.17 – Modelos empíricos obtidos.....	95

Toda a nomenclatura utilizada ao longo do trabalho é apresentada de seguida juntamente com os respetivos significados. Contudo, a terminologia listada abaixo é dividida em dois grupos distintos: símbolos e abreviaturas.

## Símbolos

$F_b$	Força na rotura [N]
$F_{max}$	Força máxima [N]
$H_0$	Hipótese nula num teste de hipóteses
$H_1$	Hipótese alternativa num teste de hipóteses
$k$	Número de fatores
$MS_E$	Quadrados Médios dos Resíduos
$MS_R$	Quadrados Médios da Regressão
$n$	Número de observações em cada experiência
$R^2$	Coeficiente de determinação
$\bar{R}^2$	Coeficiente de determinação ajustado
$S_b$	Deslocamento na rotura [mm]
$S_i^2$	Variância amostral da i-ésima experiência
$(S/N)_i$	Razão Sinal-Ruído da i-ésima experiência
$SS_E$	Soma dos Quadrados dos Resíduos
$SS_R$	Soma dos Quadrados da Regressão
$SS_T$	Soma dos Quadrados Total
$t_{arref}$	Tempo de arrefecimento [s]
$t_c$	Tempo de ciclo [s]
$t_{f,a,e}$	Tempo de ciclo seco [s]
$t_{inj}$	Tempo de injeção e segunda pressão [s]
$W$	Trabalho à rotura [N·mm]
$x_i, x_j, x_k$	Variáveis de controlo
$y$	Resposta do processo
$y_{ij}$	j-ésima observação da experiência i
$\hat{y}$	Resposta prevista do processo
$\bar{y}$	Resposta média do processo
$\bar{Y}_i^2$	Média amostral da i-ésima experiência
$\alpha$	Nível de significância do teste de hipóteses
$\alpha^*$	Pontos extremos no planeamento composto central
$\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$	Coeficientes do polinómio
$\varepsilon$	Erro do polinómio
$\sigma^2$	Variância
$\eta$	Função de superfície de resposta

## Abreviaturas

<b>ANOVA</b>	Análise de Variância
<b>BoP</b>	<i>Bill of Process</i>
<b>C1</b>	Curso do fuso [mm]
<b>C3</b>	Curso de comutação [mm]
<b>CCC</b>	Planeamento composto central circunscrito
<b>CCD</b>	Planeamento composto central
<b>CCF</b>	Planeamento composto central de face centrada
<b>CCI</b>	Planeamento composto central inscrito
<b>CMM</b>	Máquina de medição por coordenadas
<b>CPx</b>	Almofada [mm]
<b>DOE</b>	Desenho de Experiências
<b>EOF</b>	<i>End of fill</i>
<b>IR</b>	Taxa de intensificação do fuso
<b>KPC</b>	Característica chave do produto
<b>PCP</b>	Plano de Controlo do Processo
<b>PET</b>	Politereftalato de etileno
<b>PFD</b>	Fluxograma de Processo
<b>PFMEA</b>	Análise dos Modos e Efeitos de Falha Potencial de Processo
<b>PHu</b>	Pressão de comutação [bar]
<b>PNs f</b>	Pós-pressão final [bar]
<b>PNs i</b>	Pós-pressão inicial [bar]
<b>PVs</b>	Pico de pressão de injeção [bar]
<b>QCI</b>	Característica de interface qualidade/cliente
<b>RPD</b>	Projeto Robusto de Parâmetros
<b>RSM</b>	Metodologia de Superfície de Resposta
<b>SSx</b>	Curso total de dosagem [mm]
<b>VSx</b>	Volume de dosagem [mm <sup>3</sup> ]
<b>Z2x</b>	Tempo de pós-pressão [s]
<b>Z3</b>	Tempo de pausa para dosagem [s]
<b>Z4x</b>	Tempo de arrefecimento [s]
<b>ZSx</b>	Tempo de injeção [s]
<b>ZUs</b>	Tempo total de ciclo [s]

# Introdução, Objetivos e Estrutura

## 1.1 Introdução

A indústria de transformação de plásticos é uma das mais significativas a nível mundial, sendo o processo de moldação por injeção o mais importante para fabricação de produtos plásticos em massa, dadas as características e custos dos produtos obtidos.

A moldação por injeção começou a ser desenvolvida entre o início e meados do séc. XIX, sendo o seu conceito oriundo da indústria de fundição de metal. Alexander Parkes, em 1862 e John Hyatt, em 1869, foram os primeiros impulsionadores deste processo tecnológico ao terem produzido o primeiro plástico (nome dado ao material polimérico nesta indústria) e o primeiro protótipo de máquina de injeção, respetivamente. Desde então, as matérias-primas, máquinas e tecnologias inerentes à moldação por injeção sofreram constantes evoluções, permitindo que hoje em dia haja uma produção mais consistente e robusta de peças com dimensões muito variadas e com uma elevada complexidade geométrica apenas em alguns segundos, sem que seja necessária a presença humana para controlo das máquinas [1, 2].

Apesar de todo este progresso verificado ao longo dos anos, as empresas que operam em setores que utilizam a tecnologia de moldação por injeção enfrentam diversos problemas relacionados com a falta de sistematização e otimização na correta definição das variáveis de controlo de todo o processo produtivo. Por outro lado, nesses setores e em particular na indústria automóvel dada as suas produções em grande escala e requisitos normativos tão exigentes, sente-se uma grande pressão competitiva que obriga as empresas a terem de obter rapidamente produtos segundo os requisitos de qualidade exigidos por parte dos clientes, a um custo final competitivo. Assim torna-se indispensável a definição de estratégias estruturadas que permitam o estabelecimento de uma robustez paramétrica, com variações mínimas entre os resultados obtidos em diferentes equipamentos, ao contrário da habitual filosofia de “tentativa e erro” que tem por base fazer variar um fator de cada vez. Algumas dessas estratégias consistem na aplicação de ferramentas estatísticas,

nas quais são utilizados Desenhos de Experiências e subsequentes metodologias para investigar os aspetos tecnológicos e fenomenológicos de todo o processo.

## **1.2 Enquadramento do trabalho na empresa Delphi Technologies**

A injeção de plásticos é uma das tecnologias mais usadas em todo o mundo na fabricação de componentes para a indústria automóvel. Uma das empresas que recorre a esta tecnologia e com a qual foi estabelecida uma parceria para a realização deste trabalho é a Delphi Technologies, presente no Seixal.

A Delphi Technologies é uma empresa tecnológica líder global ao serviço do setor automóvel. Esta empresa fornece soluções de propulsão para veículos elétricos e motores de combustão interna, para além de solucionar os desafios de emissões e economia de combustível dos principais construtores automóveis mundiais. A Delphi Technologies também fornece soluções para os seus serviços de pós-venda. Fundada em 1994 pela General Motors (GM) com o nome Automotive Components Group (ACG) e após ter sido alvo de diversas renomeações e reestruturações ao longo da sua existência, a Delphi conta hoje com mais de 20 mil funcionários distribuídos por 20 instalações industriais e 12 grandes centros técnicos, em 24 países.

A unidade fabril da Delphi Technologies presente no Seixal iniciou a sua atividade em abril de 1990, sendo nessa data fundada como Delco-Remy (pertencente à General Motors) e cerca de 5 anos mais tarde renomeada para Delphi Automotive Systems – Seixal. Em dezembro de 2017 efetivou-se a já anunciada separação da Delphi Automotive PLC, do seu segmento de *Powertrain Systems*. Este, por sua vez, deu origem a uma nova empresa denominada Delphi Technologies, que prevalece até aos dias de hoje. A Delphi Technologies Seixal (vulgarmente conhecida como Delphi Seixal) tem cerca de 600 colaboradores, entre os quais engenheiros, técnicos, operadores e pessoal administrativo, e ocupa uma área de 12500 m<sup>2</sup> distribuída maioritariamente pelos seus 2 hangares principais. Esta empresa é especializada na produção de bobinas de ignição, sensores e atuadores para as principais fábricas de motores, sendo a produção dos componentes plásticos que fazem parte destes produtos realizada através do processo de injeção de plásticos. No entanto é de referir que nos últimos anos tem-se verificado uma tendência decrescente na produção de sensores e atuadores e um maior foco e especialização na produção de bobinas de ignição. Atualmente, a Delphi Seixal é fornecedora de cerca de 30 clientes distribuídos mundialmente por quase 100 locais diferentes, sendo a quase totalidade da sua produção exportada. A visão da empresa passa por ser o principal parceiro automóvel global dos seus clientes, com soluções inovadoras e focadas em valor, economia de combustível e soluções de pós-venda. Como tal, esta empresa segue uma filosofia 6-Sigma, muito utilizada na indústria automóvel, implementando um conjunto de práticas utilizadas para uma melhoria sistemática dos processos produtivos (em particular, no processo de injeção de plásticos),



de modo a minimizar o número de produtos não conformes e a maximizar a qualidade do produto final e a segurança dos consumidores. Esta estratégia obriga a recorrer a ferramentas de controlo estatístico e de melhoria contínua [3].

### 1.2.1 Bobinas de ignição

Como foi referido previamente, na Delphi Seixal são produzidas bobinas de ignição, sensores e atuadores para a indústria automóvel, tendo nos últimos anos a empresa dado um maior enfoque ao primeiro. Como tal, nesta dissertação o estudo elaborado incide-se neste produto, mais concretamente, num dos seus principais componentes plásticos.

Desde os primórdios da construção de motores de combustão interna, um dos maiores desafios dos engenheiros tem sido garantir a otimização da ignição da mistura ar/combustível no interior dos cilindros. No caso dos motores de ignição por faísca, essa ignição ocorre geralmente na fase final da compressão através de uma faísca produzida na vela de ignição. Para tal, a corrente elétrica gerada na bateria, tipicamente com uma tensão de 12 V, deve ascender a valores na casa dos milhares de volts e ser descarregada entre os elétrodos da vela no tempo de ignição correto e garantir a inflamação da mistura. Esta é a função de uma bobina de ignição como parte integrante do sistema de ignição [4, 5].

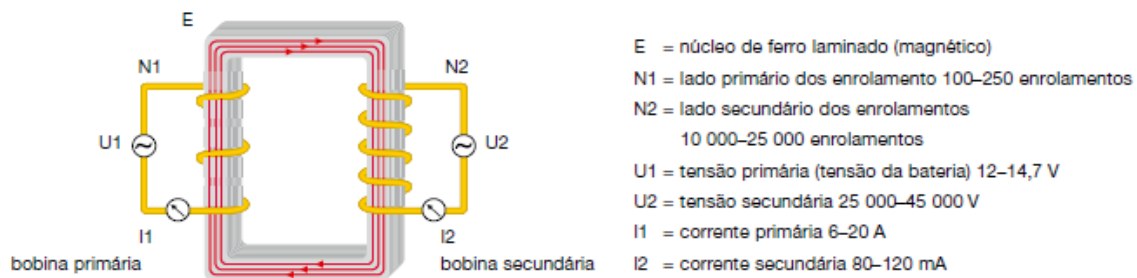
As bobinas de ignição têm como base o princípio de funcionamento de um transformador. São constituídas, essencialmente, por um enrolamento primário, um enrolamento secundário, um núcleo ferromagnético e um revestimento exterior (*case*). O núcleo de ferro laminado de elevada permeabilidade magnética é envolto por dois elementos da bobina, isolados entre si:

- O enrolamento primário, ligado em série com a bateria, fabricado em fio de cobre esmaltado com uma espessura entre 0,6 e 0,9 mm e centenas de espiras;
- O enrolamento secundário, fabricado em fio de cobre esmaltado com uma espessura entre 0,05 e 0,1 mm, dezenas de milhares de espiras e uma das suas extremidades ligada em série com a vela de ignição.

A relação entre o número de espiras do enrolamento primário e do enrolamento secundário é referida como a relação de transformação. No caso das bobinas de ignição esta relação é tipicamente de 1:100 [4, 6].

No momento em que o interruptor de ignição é acionado, os contactos são fechados e a corrente elétrica passa do pólo positivo da bateria do automóvel para o enrolamento primário da bobina de ignição, gerando um campo magnético à volta do núcleo de ferro. No momento de ignição, o circuito é aberto, ocorrendo um corte de corrente. O colapso do campo magnético provocado pela

diferença de potencial de 12 V para 0 V na bobina primária induz uma tensão no enrolamento secundário até cerca de 40 000 V, com uma intensidade de corrente muito reduzida (Figura 1.1). Este valor de tensão no enrolamento secundário depende diretamente da relação de transformação, da qualidade do núcleo ferromagnético e do campo magnético. Por fim, a corrente existente na bobina secundária é descarregada na vela de ignição provocando a inflamação da mistura ar/combustível e consequente ignição [4, 5, 7].



**Figura 1.1** – Esquemática do princípio de funcionamento de uma bobina de ignição (Adaptado de [4])

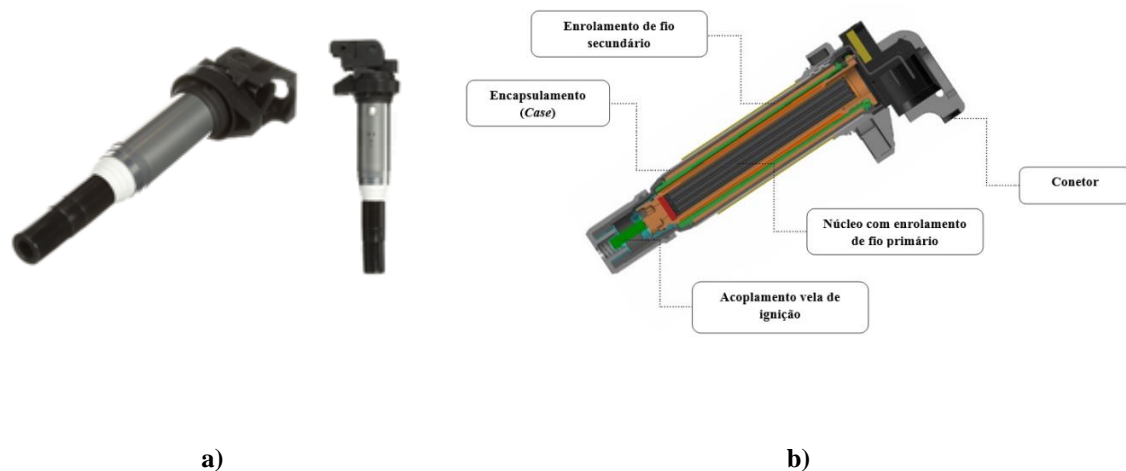
Diversos tipos de ignições foram introduzidos no mercado de modo a respeitar os níveis de emissões poluentes e economia de combustível cada vez mais austeros e que fossem de encontro às necessidades específicas dos construtores automóveis. Na Figura 1.2 está esquematizada a evolução dos principais tipos de bobinas de ignição existentes até hoje. Todas estas configurações são utilizadas hoje em dia, contudo, com a evolução dos motores, estes tornaram-se mais pequenos e compactos, pelo que houve a necessidade de revolucionar o *design* das ignições e fazer com que estas também tivessem menores dimensões.



**Figura 1.2** – Evolução dos tipos de bobinas de ignição utilizadas (Adaptado de [8])

As bobinas de ignição mais utilizadas atualmente são as que fazem uso do sistema de faísca única. Nestes sistemas, cada vela de ignição tem a sua própria bobina de ignição. Assim, cada câmara de combustão tem uma fonte de alta tensão independente, não sendo necessários cabos de ignição, uma vez que a bobina é conetada diretamente sobre a vela. Existem dois tipos de bobinas de ignição

de faísca única: as bobinas de ignição de haste compacta (*coil on plug coils*) e as bobinas de ignição de haste tipo lápis (*pencil coils*). As bobinas de ignição estudadas nesta dissertação são do tipo *pencil coil* (Figura 1.3 a)). Estas são apenas um dos diversos tipos de bobinas de ignição produzidas e montadas na Delphi Seixal. Estas ignições caracterizam-se por otimizarem o espaço disponível no compartimento do motor, graças à sua forma cilíndrica. Os seus principais componentes apresentam uma simetria rotacional e estão posicionados ao longo da haste que se assemelha a um lápis (*pencil*). Nestas bobinas de ignição, o enrolamento primário (juntamente com o núcleo de ferro) encontra-se inserido no interior do enrolamento secundário, que por sua vez se encontra inserido na *case*, servindo esta de revestimento exterior aos dois primeiros, como ilustrado na Figura 1.3 b). Entre os fios dos enrolamentos primário e secundário é impregnada resina epóxi de modo a que a corrente não faça curto-circuito entre espiras, fenómeno ainda mais relevante neste tipo de ignição dado que está sujeito a maiores cargas térmicas e vibrações que outros tipos de bobinas de ignição.



**Figura 1.3** – Bobina de ignição do tipo *pencil coil*: **a)** configuração externa; **b)** configuração interna  
(Adaptado de [9])

### 1.3 Motivação e Objetivos

A motivação que conduziu à realização deste trabalho nasceu da colaboração com a empresa Delphi Technologies presente no Seixal. Sendo a Delphi Technologies uma empresa líder na produção de componentes eletrónicos para a indústria automóvel, com elevadas densidades de produção, é imperativo garantir o cumprimento da filosofia “fazer bem à primeira”. Apesar do princípio de funcionamento das bobinas de ignição (produto de maior relevância na empresa) ser baseado em transmissão de energia elétrica, constata-se que muitos dos seus componentes são poliméricos, fabricados pelo processo de moldação por injeção. Esses componentes devem possuir

determinadas dimensões e propriedades mecânicas que permitam suportar as condições a que são sujeitos quando postos ao trabalho. Isso deve ser evidenciado em análises metrológicas e testes baseados em ensaios destrutivos após a fase de preparação dos moldes, a qual antecede a fase de produção. No processo de moldação por injeção dá-se especial foco à fase de pressurização por ter uma maior influência nas propriedades finais do produto, no que diz respeito à sua massa e resistência ao impacto como também garantir as características dimensionais das peças. A utilização dos valores ideais nos parâmetros desta fase é então fundamental para a obtenção das características desejadas no produto injectado.

Posto isto, a principal motivação que está na base da realização deste trabalho está relacionada com as dificuldades sentidas pela indústria produtora de componentes automóveis (neste caso concreto, pela Delphi Seixal) em garantir uma robustez no processo de moldação por injeção de modo a obter peças plásticas com as dimensões e as propriedades mecânicas requeridas. Como consequência desta motivação, surge a necessidade de aplicar um Desenho de Experiências (*Design of Experiments* - DOE) que permita uma otimização dos valores das variáveis a utilizar em produção e perceber o comportamento do material em função dessas variáveis, ao contrário da experimentação de um fator de cada vez, planeada de acordo com a intuição e experiência profissional dos engenheiros de processo.

O objetivo principal desta dissertação é o estudo da influência dos parâmetros de pressurização nas características dimensionais e mecânicas de *cases* obtidas pelo processo de moldação por injeção. Este estudo visa a demonstração da Metodologia de Resposta em Superfície e da Razão Sinal-Ruído, enquanto ferramentas estatísticas indispensáveis no estudo dos efeitos dos parâmetros de pós-pressão nas respostas estudadas.

Para que o objetivo principal possa ser cumprido torna-se necessária a implementação de outras estratégias precedentes à aplicação do DOE que permitam uma caracterização pormenorizada de toda a área de injeção de plásticos da empresa. Assim, definem-se três objetivos complementares:

1. Construção do *Bill of Process* da área, no qual são enumerados todos os parâmetros e características relativas aos principais elementos que juntos compõem o processo de injeção (máquinas, controladores de temperatura, desumidificadores e aspiradores);
2. Construção de novas folhas de *setup* contendo todos os parâmetros de afinação e de controlo possíveis de definir nas máquinas de injeção existentes e os resultados dos estudos de preparação do molde;
3. Execução dos testes de preparação do molde de injeção para validação paramétrica deste. Os *outputs* destes testes são ainda influentes na definição dos níveis dos fatores considerados no Desenho de Experiências.

## 1.4 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada em cinco partes distintas: **Introdução**, **Estado da Arte**, **Procedimento Experimental**, **Resultados** e **Conclusões**, com os respetivos conteúdos indicados de seguida:

**Introdução** – Esta primeira parte do trabalho é composta pelo Capítulo 1. Aí, é exposta uma contextualização do tema, é apresentada a empresa com a qual foi estabelecida uma parceria para realização desta dissertação e o respetivo componente a estudar produzido na empresa. São ainda apresentadas as principais motivações que conduziram à realização do trabalho e procede-se à definição dos objetivos a atingir na conclusão do mesmo. Por fim, é apresentada a estrutura do documento.

**Estado da Arte** – No Capítulo 2 é efetuada uma revisão ao estado da arte, na qual são apresentados os resultados da pesquisa bibliográfica realizada, com a respetiva explicação dos conceitos teóricos fundamentais subjacentes ao trabalho. Os principais temas abordados e em que este capítulo se divide são o processamento de material polimérico, o ciclo de moldação, os alimentadores, os desumidificadores e os controladores de temperatura.

**Procedimento Experimental** – Esta parte do trabalho, composta pelo Capítulo 3, é dedicada à apresentação das metodologias e técnicas a serem utilizadas e ao procedimento experimental adotado. É explicada a construção do *Bill of Process* e das novas folhas de *setup*, é feita uma caracterização do equipamento e material utilizado na componente experimental e é apresentado todo o procedimento experimental nomeadamente a preparação do molde e a aplicação da Metodologia de Superfície de Resposta (RSM) associada ao Desenho de Experiências (DOE).

**Resultados** – Esta parte do trabalho é composta pelo Capítulo 4 e nele são apresentados e discutidos os resultados da preparação do molde, da Metodologia de Superfície de Resposta e da análise à Razão Sinal-Ruído e ao declive da reta.

**Conclusões** – Na última parte deste documento, mais concretamente, no Capítulo 5, são apresentadas as principais conclusões retiradas do estudo efetuado, contribuições inovadoras, bem como sugestões para desenvolvimentos futuros que podem complementar e dar continuação a este trabalho.



## Revisão do Estado da Arte

A apresentação dos principais conceitos associados à moldação por injeção é realizada neste capítulo, de modo a obter uma melhor compreensão do assunto abordado nesta dissertação. Dá-se a conhecer a indústria de processamento de plásticos, o conjunto de fases que constituem o processo de moldação por injeção e os equipamentos nele utilizados.

### 2.1 Processamento de plásticos

Nos dias de hoje a sociedade faz uso de peças plásticas ou aglomerados dessas mesmas peças numa grande variedade de aplicações domésticas, comerciais e industriais. Sendo que a síntese de polímeros proporciona matéria-prima para a indústria dos plásticos, tornou-se necessário inventar e desenvolver tecnologias de processamento para conversão de polímeros em produtos plásticos que vão de encontro à procura do mercado e das aplicações. Este desenvolvimento, associado a uma constante inovação assume-se como um grande desafio, ao qual a indústria dos plásticos e, por sua vez, do processamento desses mesmos materiais tenta responder da melhor forma, tornando-a um dos setores mais notáveis, globalmente.

A nível mundial esta tem sido uma atividade em contínuo crescimento há mais de 50 anos, sendo que na Europa se tem verificado um ligeiro crescimento nos últimos anos, após a queda em 2009 originada pela crise económica fortemente sentida. A indústria nacional tem tido um crescimento assinalável nos últimos anos, o que se reflete num grande investimento por parte das empresas portuguesas produtoras de moldes, nomeadamente, na área dos moldes para injeção de plásticos. Portugal é um dos principais fabricantes mundiais de moldes (8º a nível global, 4º a nível europeu), sendo a indústria automóvel a principal indústria servida por este setor [10, 11].

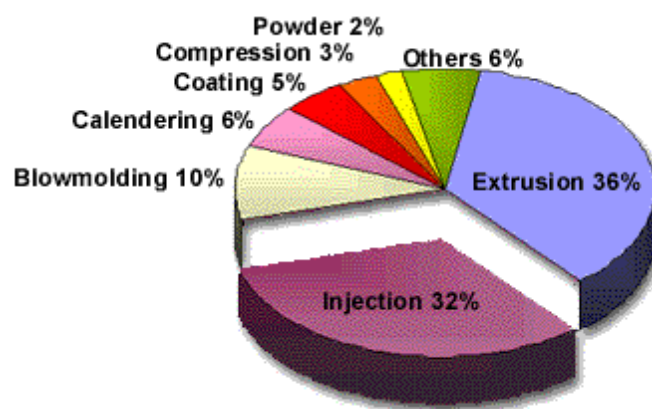
O processamento de plásticos, na sua definição mais geral, refere-se à sequência de operações que envolvem a produção de plásticos a partir da transformação de compostos poliméricos. Um sistema de processamento de plásticos típico começa com o material no estado sólido, em forma granular ou em pó, e termina com a sua transformação num produto sólido que deve ir de encontro às especificações em termos de formato, dimensões e propriedades mecânicas que lhe são requeridas nas condições de trabalho a que vão ser sujeitos. Nesta sequência de operações o material experiencia

diferentes transformações durante o transporte, aquecimento, fusão, escoamento (de material fundido), moldação (numa matriz ou molde) e solidificação (após arrefecimento ou cura do material) [12].

Atualmente existe uma grande variedade de métodos que podem ser utilizados para processamento de plásticos, quer estes sejam métodos convencionais, quer sejam novas variantes e inovações emergentes relativamente a esses mesmos métodos. Os processos emergentes têm como objetivo estender a aplicabilidade, capacidade, flexibilidade, produtividade e rentabilidade do processo. Para além disto, com estes processos consegue-se introduzir uma maior liberdade no projeto das peças a injetar, podendo estas possuir características geométricas únicas, maiores resistências mecânicas e ainda melhores qualidades superficiais e dimensionais, culminando em propriedades dos materiais melhoradas e benefícios económicos [2].

Alguns dos principais processos de injeção de plásticos são: moldação por injeção, extrusão, moldação por sopro, moldação por transferência, moldação por compressão, moldação rotacional, moldação por injeção e reação – RIM, e termoenformação.

Tal como se encontra ilustrado na Figura 2.1, de todos os processos tecnológicos de transformação e processamento de plásticos, a extrusão e a moldação por injeção são os dominantes industrialmente, representando aproximadamente 36% e 32% de todos os produtos plásticos existentes, respetivamente [13].



**Figura 2.1** – Consumo mundial de plásticos por processo industrial [13]

Cada um dos processos industriais anteriormente enumerados apresenta as suas vantagens e desvantagens, sendo adequado para apenas algumas aplicações. Como tal, a decisão sobre qual a tecnologia de processamento mais adequada é crítica e requer um conhecimento amplo dos métodos existentes. Alguns dos fatores comparativos entre os vários processos de transformação existentes, para uma correta seleção da tecnologia a utilizar são: geometria das peças, dimensões das peças



(gerais e tolerâncias), volume de produção, materiais processáveis, custo das peças, custo das ferramentas, tempo de ciclo e modo de trabalho [14, 15].

Para outros processos com características especiais relativamente ao processo convencional de moldação por injeção existe a necessidade de incorporar outros fatores na categorização, como a incorporação de material(is) ou componente(s) adicional(is) na peça moldada, a constituição e manipulação do fundido, o movimento do molde e as características geométricas especiais da peça [2]. Sendo que o trabalho desenvolvido nesta dissertação tem como foco o processo de moldação por injeção passa-se de seguida a abordar o mesmo.

### 2.1.1 O Processo de Moldação por Injeção

De todas as tecnologias de processamento de plásticos, a moldação por injeção é a mais dinâmica e versátil. O grande sucesso desta tecnologia fica a dever-se ao efeito combinado de uma série de vantagens comparativas, como a capacidade de obtenção de produtos tridimensionais com formas complexas e excelentes tolerâncias dimensionais, a quase inexistência de operações de acabamento e de montagem, bem como os baixos custos de produção. Na Tabela 2.1 são mostradas estas e outras características deste processo, com base nos fatores enunciados anteriormente [12].

**Tabela 2.1** – Principais características do processo de moldação por injeção (Adaptado de [14])

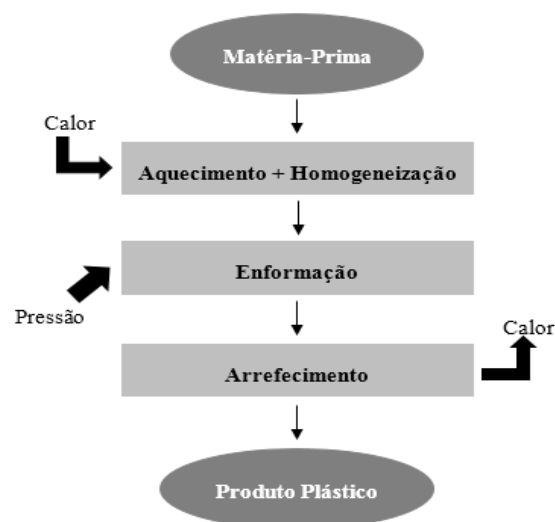
Características	Processo de moldação por injeção
Geometria das peças	Muito simples a muito complexas
Dimensões das peças	Muito pequenas a grandes
Volume de produção	Elevado
Seleção de Materiais processáveis	Extensiva
Custo das peças	Muito baixo
Custo das ferramentas	Muito alto
Tempo de ciclo	Segundos
Modo de trabalho	Automático

A gama de produção vai desde as micromoldações, inferiores a 1 mg, até peças com mais de 100 kg, durante um tempo de ciclo que vai desde alguns segundos até várias dezenas de minutos para moldações muito espessas. Para tempos de ciclo relativamente curtos, isto é, de alguns segundos, podem ser produzidas diariamente milhares de peças em máquinas injetoras a trabalhar em ciclo automático, qualquer que seja o número de cavidades que compõem o molde [13, 16].

Neste espectro de produção estão englobadas aplicações referentes aos mais diversos tipos de indústrias, destacando-se as seguintes: automóvel, aeronáutica, elétrica e eletrónica, construção civil, telecomunicações, medicina, brinquedos e embalagens para a indústria química e alimentar [14, 16].

Podem ser moldados por injeção termoplásticos, termoendurecíveis e elastómeros vulcanizados (borrachas ou silicones). Mais recentemente, a moldação por injeção também tem sido utilizada para o fabrico de peças cerâmicas ou metálicas, a partir de compostos que utilizam um material polimérico como vetor. A quase totalidade dos materiais de natureza termoplástica podem ser moldados por este processo, incluindo variedades com cargas, fibras, ou agentes expansores. Associando ainda ao facto de que a larga maioria das aplicações utilizam estes materiais, tem particular interesse descrever o processo de moldação por injeção de termoplásticos.

A moldação por injeção de termoplásticos pode ser definida como o processo a partir do qual o material plástico, originalmente no estado sólido (geralmente na forma de granulado) através de diferentes processos térmicos e mecânicos, efetuados por uma máquina injetora, toma uma determinada configuração pretendida. Este processo obedece à rotina típica de transformação dos materiais termoplásticos, esquematizada na Figura 2.2.



**Figura 2.2** – Rotina de transformação de termoplásticos em moldação por injeção (Adaptado de [16])

De um ponto de vista conceptual, em primeiro lugar, o plástico é colocado na tremonha (funil de carga) da máquina injetora e alimentado para o interior do cilindro de plasticização onde aí é sujeito a um aquecimento, para obtenção de um fundido homogéneo com viscosidade suficientemente baixa. Esse aquecimento é garantido pelo calor gerado por efeito de dissipação

viscosa, em resultado do esforço mecânico da rotação do fuso (presente no interior do cilindro) e pelo calor transmitido através das paredes do cilindro por bandas de aquecimento elétricas.

Seguidamente, o fundido resultante é forçado a fluir para o interior de um molde, onde irá preencher a respetiva cavidade, sendo enformado sob alta pressão. Por fim, o material permanecerá no molde até terminar o seu período de arrefecimento, isto é, até atingir uma temperatura que permite um ganho de rigidez suficiente para que possa ocorrer uma extração correta da peça, com a forma final pretendida.

## 2.2 Ciclo de moldação

A moldação por injeção é um processo dinâmico e cíclico. O conjunto de operações que se efetuam numa máquina injetora necessário à produção de uma moldação designa-se por ciclo de moldação. Este ciclo pode desenvolver-se segundo os regimes seguintes:

- **Manual:** Utiliza-se durante a fase de ajuste do processo, tendo o operador de definir e acionar a sequência de operações.
- **Semi-automático:** Utiliza-se quando o processo requer a intervenção do operador, por exemplo, para ajudar a retirar uma peça ou para colocar insertos. Neste regime, a sequência de operações do ciclo desenvolve-se de uma forma automática, mas o início de um novo ciclo necessita de confirmação por parte do operador.
- **Automático:** O processo desenvolve-se integralmente segundo uma sequência pré-definida e sem a intervenção do operador. A maximização da produtividade e da fiabilidade só é conseguida neste regime, até porque muitas das funções de controlo das máquinas mais modernas só estão ativas neste tipo de funcionamento.

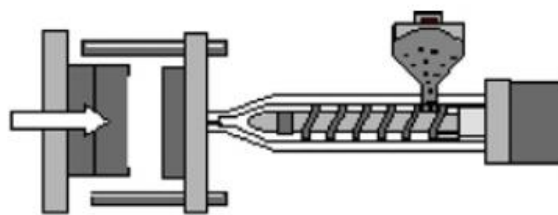
O ciclo de moldação pode ser dividido, simplificadaamente, em seis fases sucessivas, sincronizadas e praticamente independentes do tipo de máquina injetora.

### 2.2.1 Fase 1 – Fecho e trancamento do molde

O ciclo de moldação tem início com o fecho e trancamento do molde de injeção, no qual uma metade do molde fecha sobre a outra para dar forma à cavidade de moldação (Figura 2.3). Quando o molde estiver praticamente fechado, é aplicada uma alta pressão de fecho que irá garantir o trancamento deste. Findo esse movimento, a força de fecho a ser aplicada pela máquina deve ser suficiente para suportar a alta pressão de injeção que vai existir na cavidade, não deixando haver fuga de material.

O tempo de fecho do molde deve ser tão curto quanto possível. Contudo, existem limitações às velocidades de fecho a utilizar, como por exemplo, a necessidade de o encosto das duas partes do molde ser suave para não haver danos nas superfícies de ajustamento ou o facto de existir uma grande inércia por parte das massas metálicas dos conjuntos moldes/pratos da máquina.

O tempo para esta operação depende do curso de fecho (distância a percorrer pelo molde), das performances da máquina e ainda das características do próprio molde. A utilização de um perfil ajustável de velocidade e de força, com recurso a funcionalidades como a proteção de molde (em eventuais encravamentos de peças na cavidade ou entre as placas do molde) ou o amortecimento de fecho, e a correta seleção do intervalo de abertura entre as metades do molde (mínimo para permitir a ejeção das peças) são algumas práticas comuns para otimização desta fase [1, 16].



**Figura 2.3** – Fecho e trancamento do molde de injeção (Adaptado de [17])

### 2.2.2 Fase 2 – Injeção

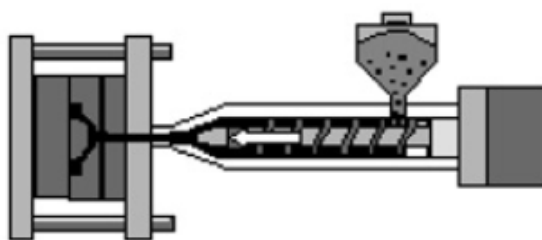
Na fase de injeção, também conhecida por fase de enchimento, o material fundido é forçado a entrar no molde e a fluir no interior da cavidade devido ao movimento linear do fuso, que nesta fase assume a função de um pistão (Figura 2.4). A injeção inicia-se após se verificar o encosto do bico de injeção na bucha do canal de injeção do molde e deverá terminar quando a cavidade está preenchida entre 95% e 98% do respetivo volume.

Para cada moldação a efetuar, o deslocamento de material (previamente depositado à frente do fuso) deverá obedecer a um determinado perfil de velocidade ajustável que é resultado de:

- Um compromisso entre rapidez e qualidade do produto, fundamental para garantir um correto enchimento da cavidade e minimização da camada de material solidificado junto às paredes do molde, dadas as diferenças de temperatura entre estas e o fundido;
- Uma pressão específica de injeção que deve ser mínima e cujo nível deve ir de encontro às especificações do material e do molde utilizados, garantindo a qualidade pretendida para o produto final.

Na indústria é prática comum recorrer a caudais de injeção entre 100 e 500 cm<sup>3</sup>/s e pressões de injeção entre 300 e 2500 bar, devendo ter por base os dados fornecidos pelos fabricantes do molde e da matéria-prima utilizada.

Uma vez que o material fundido ao entrar no molde arrefece quase que repentinamente nas camadas próximas às paredes, esta fase é especialmente responsável pela aparência e cristalinidade da superfície das peças produzidas. Apesar dessa grande diferença de temperaturas, o fundido agora a uma temperatura mais baixa deve fluir no interior do molde, pelo que é aconselhável um percurso mínimo entre o molde e a unidade de injeção [16].



**Figura 2.4** – Enchimento do molde de injeção (Adaptado de [17])

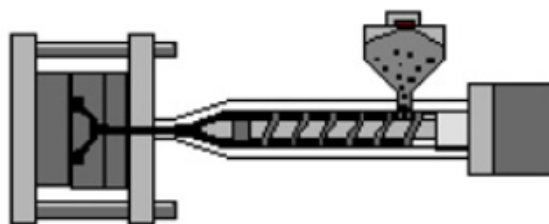
### 2.2.3 Fase 3 – Pressurização

Para compensar o efeito da contração volumétrica sofrida pelo material por arrefecimento, continua-se a pressurizar a cavidade. Para tal, recorre-se a uma fase de compactação (*packing*), onde a quantidade de plástico requerida para preencher volumetricamente a cavidade de moldação, fornecida a uma velocidade inferior à de injeção, é aí compactada (Figura 2.5).

No final da fase de compactação, se a pressão exercida na cavidade fosse removida, como consequência da alta pressão existente no interior desta, iria ocorrer refluxo do fundido. Como tal, seguidamente à fase de compactação, a pressão continua a ser exercida, sendo que se está na presença de uma fase de manutenção (*holding*). Esta fase termina logo que a entrada do material nas zonas moldantes (ataque) seja inibido, o que se verifica quando ocorre um arrefecimento suficiente da peça e uma solidificação do ponto de injeção.

É difícil determinar o ponto de comutação entre as fases de compactação e de manutenção sem utilizar algum tipo de método avançado, como sensores de pressão intra-cavidade. Como tal, na maioria dos casos estas fases são consideradas apenas como uma só, designada por fase de pressurização (também conhecida por pós-pressão ou segunda pressão). Por sua vez, quando é referido o ponto de comutação, este é alusivo ao ponto de transição entre as fases de injeção e de pressurização.

No início desta fase verifica-se uma mudança no regime de funcionamento do equipamento, em que se passa de uma fase de controlo de velocidade de injeção, para uma fase de controlo de pressão, cujo ajuste é crítico para a qualidade do processo. Tal é constatado pelo facto de que no fim da fase de injeção, se não houvesse uma adição e compactação de plástico, as peças produzidas estariam sub-pressurizadas e exibiriam defeitos como rechupes e vazios. Por outro lado, a pressurização também não deve ser excessiva, pois isso pode traduzir-se em peças com tensões internas, de difícil extração e com rebarbas [1, 16].



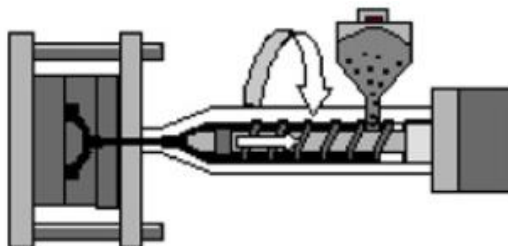
**Figura 2.5** – Aplicação da pós-pressão (Adaptado de [17])

#### **2.2.4 Fase 4 – Arrefecimento e plasticização**

Uma vez que as paredes moldantes apresentam uma temperatura inferior à do fundido, o arrefecimento da moldação inicia-se a partir do momento em que se verifica o contacto entre ambos. No entanto, com o fim da fase de pressurização, inicia-se o tempo de arrefecimento ajustável. Este tempo, agora controlado na fase de arrefecimento, orienta-se essencialmente pelo processo de dosagem e pela capacidade de desmoldação da peça, ou seja, verifica-se o término desta fase assim que o volume de material apropriado para preencher a cavidade no ciclo de moldação seguinte esteja doseado e que a peça atinja uma temperatura que permita a sua desmoldação sem distorção (Figura 2.6). Tipicamente, o tempo de arrefecimento é cerca de 50%, ou mais, da duração total do ciclo de moldação (sendo mais longo no caso de materiais semi-cristalinos que nos materiais amorfos), dado que a troca de calor entre o material e o aço do molde é limitada pela baixa difusividade térmica do plástico fundido. Como esta parte do ciclo é, de facto, uma operação de troca de calor, para além das propriedades do polímero utilizado, depende ainda da espessura da moldação e do sistema de arrefecimento do molde. Baixas velocidades de arrefecimento (garantidas por temperaturas de molde elevadas) permitem uma redução das tensões internas nas peças, mas no entanto correspondem a aumentos significativos do tempo de ciclo.

O tempo de arrefecimento é aproveitado para dosear material para o ciclo seguinte, sem que para tal haja prejuízo do tempo de ciclo. Durante este processo, após se verificar o fornecimento de granulado para a área de alimentação do fuso, este começa a rodar para plastificar o material. À medida que o material vai sendo plastificado (com auxílio a calor gerado externamente ao cilindro

de plasticização) este vai-se acumulando na frente do fuso e por sua vez irá obrigá-lo a recuar devido à pressão criada pela deposição de material. Uma pressão contrária ajustável (contra-pressão) é aplicada para controlar a quantidade e a pressão do fundido acumulado na frente do fuso, garantindo assim uma plastificação homogénea. Quando o volume pretendido (*shot*) estiver doseado, o fuso para. Este *shot* de material terá de ser suficiente para garantir o preenchimento total da cavidade (fases de injeção e pressurização) e ainda uma almofada de material remanescente [12, 16, 18, 19].

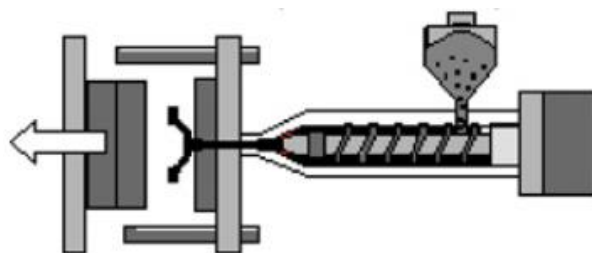


**Figura 2.6** – Arrefecimento e plasticização de material polimérico (Adaptado de [17])

### 2.2.5 Fase 5 – Abertura e extração

Com o término do tempo de arrefecimento, a máquina alivia a força de fecho e o molde abre com um perfil de velocidade ajustável. Tal como para o fecho do molde, o movimento de abertura deve ser isento de solavancos e, sempre que possível, deve permitir uma economia de tempo de ciclo (Figura 2.7). No intervalo entre a abertura e o fecho do molde a peça é extraída. Idealmente, a seguir à abertura do molde, a peça cairia por gravidade. No entanto, devido à contração (e consequente adesão) e às contra-saídas, a peça tende a ficar presa no interior do molde, geralmente, na bucha, e um sistema de extracção deve actuar para mover a peça para fora do molde.

O tempo de abertura e extração é, então, função das características da unidade de fecho da máquina utilizada, do curso de abertura do molde e dos seus movimentos necessários para garantir a extração da peça. Esta operação é crítica do ponto de vista produtivo, pois em produção de grandes séries, o sistema de extração será actuado um elevado número de vezes (tantas quantos os ciclos que o molde fizer) e não sendo este fiável, poderão ocorrer eventuais paragens na produção o que implica custos elevados, especialmente nos casos em que as peças forem incorporadas numa linha de montagem após moldação. A utilização de dispositivos auxiliares de manipulação é cada vez mais frequente para garantir um elevado grau de automatização do processo e, por sua vez, de produtividade [16, 20].

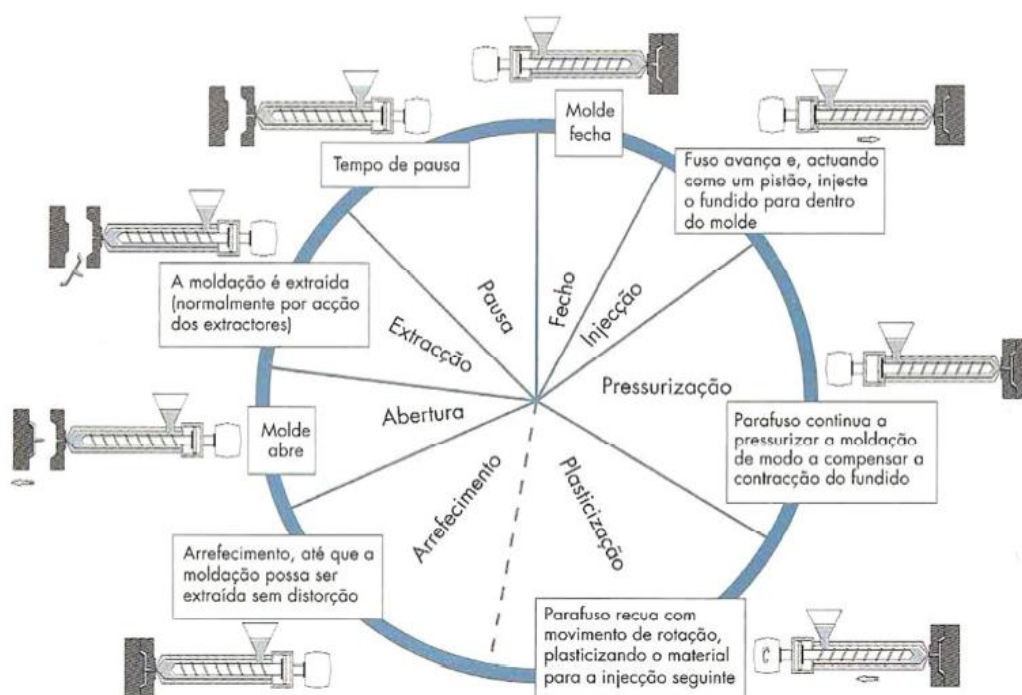


**Figura 2.7** – Abertura do molde e extração das moldações (Adaptado de [17])

### 2.2.6 Fase 6 – Tempo de pausa (Tempo morto)

Esta fase é definida pelo intervalo de tempo que decorre entre o fim da fase de extração e o início do novo ciclo. É altamente desejável que este tempo seja nulo, o que deverá acontecer em situações de funcionamento em regime automático. Ainda assim, pode ser prolongado para que as peças possam cair após a actuação dos pinos extractores e ainda nos casos em que a remoção da peça seja feita manualmente ou que tenha que ser feita a colocação de insertos. Como tal, este tempo depende do nível de automatização do molde e da aptidão dos operadores [16].

Na Figura 2.8 está esquematizado o ciclo de moldação, onde é possível observar as diferentes fases que o constituem.



**Figura 2.8** – Ciclo de moldação [16]



A otimização deste ciclo é fundamental para assegurar a competitividade económica do processo, dado o elevado investimento em capital, requerido para a instalação dos equipamentos de injeção. Para tal, deve ser garantida a maximização da produtividade, assegurada pela ausência de moldações com defeitos e pela otimização do tempo de ciclo.

O tempo total de um ciclo de moldação, em regime automático, corresponde ao somatório dos tempos de injeção, pós-pressão, arrefecimento, abertura, extração e fecho do molde, para cada moldação produzida. O tempo de ciclo ( $t_c$ ) pode ser calculado a partir da equação 2.1 [21].

$$t_c = t_{inj} + t_{arref} + t_{f,a,e} \quad (2.1)$$

Onde  $t_{inj}$  é o tempo de injeção e pós-pressão,  $t_{arref}$  é o tempo de arrefecimento e  $t_{f,a,e}$  o tempo de ciclo seco (que compreende os tempos de abertura, extração e fecho). Nas situações em que o processo se desenrole em regime semi-automático, à equação anterior deve ser acrescentado o tempo de pausa. O cumprimento desse tempo por parte de um operador, se este intervir, está intrinsecamente relacionado com o seu nível de aptidão. Como tal, nesses casos o tempo de pausa deve ser considerado com um valor médio.

## 2.3 Alimentadores

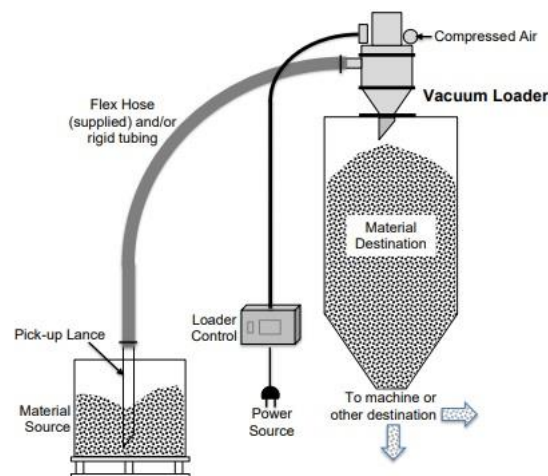
Todas as máquinas injetoras dependem de um fornecimento constante de material plástico para ser usado durante o processo de injeção. Os alimentadores foram especificamente projetados para transportar material polimérico de uma localização de armazenamento (tipicamente ao nível do chão) para uma localização elevada (tremonha da máquina injetora). Por questões de produtividade e de qualidade, o circuito de alimentação deve ter um elevado grau de automatização. Deste modo, minimizam-se as possibilidades de contaminação e de erros humanos associados a formulações.

A matéria-prima deve ser alimentada automaticamente a partir de recipientes colocados junto à máquina injetora ou de um sistema centralizado. Para o efeito, utilizam-se sistemas pneumáticos (baseados em aspiradores elétricos independentes ou redes de vácuo) ou mecânicos (baseados em espirais metálicas flexíveis). Destes, os sistemas pneumáticos são os mais utilizados no processo de moldação por injeção.

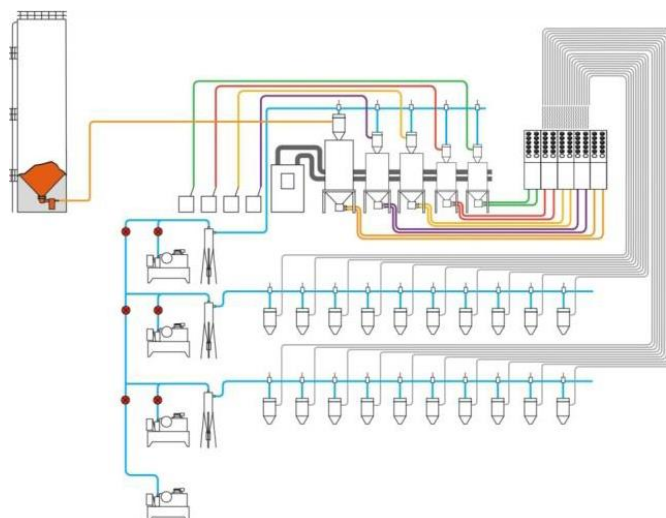
O sistema de alimentação de material mais popular é aquele que faz uso de aspiradores individuais. Os aspiradores elétricos (monofásicos ou trifásicos) são constituídos por uma unidade que possui um motor (ou bomba) montado diretamente no topo da tremonha da máquina injetora e por um tubo que possui uma extremidade conectada a essa unidade e a um recipiente de material (que pode estar a uma distância de até 15 metros da máquina injetora), como se pode verificar na Figura 2.9. Quando ligado, a unidade cria vácuo, o que promove o transporte do recipiente para a

tremonha. Estes sistemas são adequados para aplicações que requerem taxas de alimentação de até 900 kg/hora.

Um sistema central de transporte de material permite que o material polimérico seja distribuído pelas máquinas injetoras, por vezes a longas distâncias (até mais de 150 metros), através de uma rede de tubagens, até chegar aos recetores de material presentes em todas as máquinas. Estes recetores são conectados via um sistema de controlo central que permite que qualquer máquina processe qualquer material, proveniente de várias localizações. O material, que geralmente se encontra em silos ou recipientes apropriados, está situado longe da área de produção e é distribuído devido ao uso de uma bomba de vácuo central. Operações de secagem, mistura e reaproveitamento de materiais também podem ser integrados num sistema de alimentação central. Na Figura 2.10 está ilustrada uma esquematização de um sistema centralizado de alimentação de material [16, 22].



**Figura 2.9** – Sistema de alimentação que utiliza um aspirador elétrico [23]



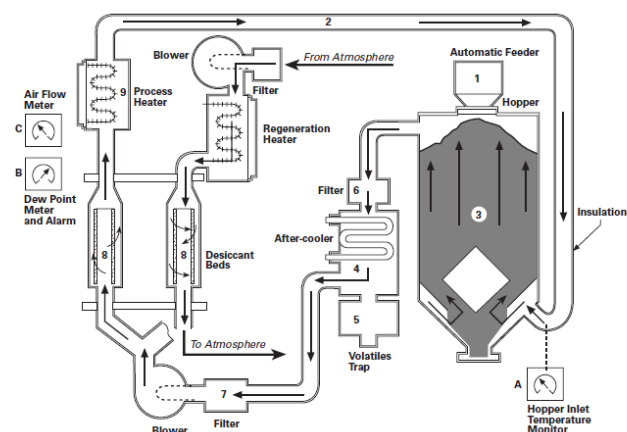
**Figura 2.10** – Esquematização de um sistema centralizado de alimentação de material [24]

## 2.4 Desumidificadores

Todos os materiais poliméricos, em particular, os materiais termoplásticos são influenciados pela quantidade de humidade que contêm antes do seu processamento. Materiais como PET, PC, ABS, nylons ou materiais fluoropoliméricos são materiais higroscópicos (ou hidrofílicos), isto é, são materiais cujas moléculas absorvem humidade até atingirem um ponto de equilíbrio com o ar circundante. Se estes materiais forem processados quando contêm excesso de humidade, as suas propriedades críticas podem-se degradar, podendo ter várias consequências: o processamento é afetado porque a humidade transforma-se em vapor no cilindro e provoca a degradação do plástico, originam-se problemas estéticos nas peças devido à presença de bolhas, rechupes e irregularidades superficiais e ainda ocorrem variações na viscosidade do material fundido, no peso molecular, nas dimensões das peças produzidas e redução de propriedades mecânicas, causando potenciais problemas de performance. Como tal, o excesso de humidade deve ser removido do interior da resina plástica até que o valor percentual remanescente no material seja menor que o valor habitualmente estabelecido como limite pelos fabricantes de polímeros e que permita a produção de uma peça aceitável. Para esse efeito é recomendada uma secagem prévia do material, conseguida com o recurso a desumidificadores.

Os desumidificadores são equipamentos que fornecem ar quente e seco, responsável pela redução da força intermolecular existente entre as moléculas do polímero higroscópico e as moléculas de água. Este aquecimento, após um período de tempo, torna possível a movimentação das moléculas de água para uma corrente de ar seco.

É de extrema importância a correta execução do processo de secagem, visto que os produtores de resinas plásticas relatam que a vasta maioria das queixas provenientes dos clientes acerca do desempenho do material estão relacionadas com uma secagem imprópria ou incompleta do material. Dado que os polímeros higroscópicos se ligam às moléculas de água, pode ser difícil secá-los devidamente. Por esta razão, o projeto de sistemas de desumificação e de tecnologias de controlo continua a evoluir à medida que a indústria procura soluções de secagem que sejam as mais rentáveis e com maior eficiência energética. Atualmente, o sistema de secagem mais utilizado e mais moderno é aquele que faz uso de bandas dissecantes para absorção de humidade (Figura 2.11). Nos desumidificadores que usam este sistema de secagem, depois de ser absorvida a humidade nas bandas, o ar é aquecido e fornecido à tremonha. À medida que a humidade é absorvida pela banda dissecante, esta irá eventualmente começar a ficar saturada e por sua vez a capacidade de absorver humidade diminui, tornando o processo de secagem menos eficiente. Para corrigir este problema, existe um ciclo de regeneração durante o qual a banda é seca, o que permite que esta volte a ficar pronta para entrar no sistema de secagem [1].



**Figura 2.11** – Sistema de secagem que utiliza bandas dessecantes [25]

### 2.4.1 Parâmetros de Secagem

De modo a que a matéria-prima apresente as características pretendidas para um processamento sem problemas derivados do excesso de humidade, tipicamente são controlados cinco parâmetros fundamentais. Cada um destes é apresentado e explicado de seguida.

- **Temperatura de secagem:** Testes conduzidos por fabricantes de materiais poliméricos contribuíram para a definição de requisitos de temperatura para uma secagem apropriada. Tipicamente, para cada material produzido por um determinado fabricante, é especificada uma gama de temperaturas de secagem que otimiza a redução do nível de humidade [2].
- **Ponto de orvalho:** Um dos parâmetros usados para quantificar o nível de humidade que existe no ar é o ponto de orvalho, que se define como a temperatura à qual o ar deve ser arrefecido antes de o vapor de água condensar. Quanto maior for o nível de humidade no ar, maior é o ponto de orvalho. O ponto de orvalho é independente da temperatura do gás e nos desumidificadores, o ar fornecido tem um ponto de orvalho que se encontra tipicamente entre  $-30^{\circ}\text{C}$  e  $-60^{\circ}\text{C}$  [1, 26].
- **Humidade relativa:** A humidade relativa é o outro parâmetro que ajuda a determinar o quão seco está o ar, indicando a percentagem que relaciona a quantidade de humidade que uma amostra de ar contém comparativamente com a quantidade de humidade que poderia suportar se o ar estivesse saturado. O nível de saturação muda com a temperatura, sendo que quanto mais baixa é a temperatura, mais baixa é a quantidade máxima de humidade que consegue comportar [1].
- **Tempo de residência:** Algum tempo é dispendido para que a temperatura dos *pellets* suba por ação do ar quente e faça com que as moléculas de água se movam até à superfície da

matéria-prima. Os fabricantes de polímeros especificam um “tempo de residência” para cada material, definindo-o como o tempo que o material deve estar sujeito a uma temperatura de secagem e ponto de orvalho apropriados, no interior da tremonha. Tempos de residência excessivamente longos podem originar aumentos de viscosidade, além de descolorações. A equação 2.2 pode ser tida em conta para calcular o tempo de residência do material a processar [2, 26].

$$\text{Tempo de residência} = \frac{\text{Capacidade da tremonha}}{\text{Produção/hora}} \quad (2.2)$$

- Caudal de ar: Por toda a tremonha é fornecido ar quente e seco, que é o meio responsável pela transmissão de calor. O caudal de ar deve ser suficiente para assegurar um aquecimento consistente de toda a massa de material, á medida que esta flui, assegurando por sua vez que cada *pellet* é secado à temperatura e tempo especificados [2].

## 2.5 Controladores de temperatura

A temperatura das superfícies moldantes é uma variável crítica do processo, que deve ser criteriosamente controlada por questões de produtividade e de qualidade do produto final. Dependendo da matéria-prima utilizada e das especificações da moldação, deverá ser ajustada uma temperatura de molde (por vezes utilizam-se temperaturas distintas nas duas partes do molde) cujo controlo pode ser assegurado através da utilização de termorreguladores. Os termorreguladores (também conhecidos como unidades de controlo de temperatura) são equipamentos auxiliares que permitem regular a temperatura no interior do molde através da circulação de um fluido (água ou óleo) nos canais de refrigeração deste. Este controlo de temperatura é conseguido através da constante comparação da temperatura do fluido de refrigeração relativamente à temperatura previamente definida no equipamento: se a temperatura do fluido for superior à definida, a unidade drena algum do fluido e substitui por fluido a uma temperatura inferior, até ser igualada a temperatura definida; se a temperatura do fluido for mais baixa, uma resistência interna da unidade aquece-o até à temperatura definida, antes de ser bombeado para o molde. Unidades que não possibilitem aquecimento do fluido, simplesmente param a circulação até ter absorvido calor suficiente do próprio molde. O processo de controlo de temperatura é contínuo, requerendo a operação do termorregulador de um modo flutuante, no qual alterna o aquecimento e arrefecimento do fluido para manter a temperatura apropriada, bem como o respetivo caudal e potência definidos.

Como já foi referido anteriormente, as cristalites presentes nos polímeros cristalinos começam-se a formar quando é atingida a temperatura de cristalização, temperatura esta mais baixa que a temperatura de fusão do polímero. Se o molde estiver a uma temperatura demasiado baixa, o

polímero não será capaz de receber a energia necessária para a formação das cristalites, o que levará à perda de propriedades da peça moldada. Os fabricantes de materiais poliméricos realizam extensas pesquisas para determinar as temperaturas de molde que habitualmente são sugeridas. Portanto, é altamente recomendado permanecer dentro da gama de valores recomendadas por estes. Dado que as cristalites não estão presentes nos polímeros amorfos, as moléculas não procuram nenhuma forma de energia e como tal a gama de temperaturas do molde pode ser mais ampla e as temperaturas do molde podem ser especialmente extendidas para valores mais baixos. No entanto, deve-se ter cuidado para prevenir o aparecimento de tensões quando as peças são produzidas usando moldes demasiado frios [1, 16].

Na Figura 2.12 é apresentada uma possível configuração de um termorregulador e o respetivo *display* onde são controlados os parâmetros de processo referentes a este equipamento.



**Figura 2.12** – Exemplo de termorregulador e respetivos parâmetros de processo registados

## Metodologias e Procedimento Experimental

Neste capítulo irão abordar-se as metodologias e os equipamentos utilizados na Delphi Seixal, empresa com a qual foi estabelecida uma parceria para a realização da parte experimental deste trabalho para atingir os objetivos previamente estabelecidos. Será descrito todo o procedimento experimental, desde a construção do *Bill of Process*, seguida da renovação das folhas de *setup* e da preparação de um novo molde de injeção aplicado a um caso de estudo, até ao planeamento e realização do Desenho de Experiências associado ao Método da Superfície de Resposta a fim de analisar a influência dos parâmetros de pressurização nas respostas estudadas.

### 3.1 *Bill of Process*

O primeiro passo para a otimização do processo de moldação por injeção na Delphi Seixal consiste na elaboração de um *Bill of Process* para a área de injeção de plásticos da empresa. O *Bill of Process* (BoP) trata-se de um documento no qual estão apontados e esquematizados todos os parâmetros de entrada (*inputs*), parâmetros de saída (*outputs*) e características que influenciam um determinado processo produtivo. Nesta dissertação é apresentado o *Bill of Process* da área de injeção de plásticos da empresa com o objectivo de caracterizar na globalidade o processo de injeção de plásticos (mais concretamente, o processo de moldação por injeção) e com o intuito de no futuro prever e prevenir modos de falha no espaço de trabalho.

Sendo que para a concretização deste objetivo se considerou um ponto de vista produtivo, a caracterização foi então elaborada com foco nos equipamentos intervenientes no processo, seguindo duas abordagens distintas, porém, complementares. A primeira estratégia consiste na identificação das principais características técnicas e construtivas apresentadas por níveis, para cada uma das principais famílias de equipamentos de injeção presentes na área (máquinas injetoras, desumidificadores, controladores de temperatura e alimentadores) e ainda das respetivas entradas (fatores) e saídas (respostas), também denominados *inputs* e *outputs*. A segunda estratégia, com base na primeira abordagem referida, consiste na elaboração de um esquema das combinações de características possíveis de existir para cada família de equipamentos, isto é, detalhando o equipamento existente actualmente na empresa e respectivas quantidades. Todos os equipamentos

caracterizados são aqueles que se encontram em condições de funcionamento e que quando necessários são postos ao serviço. Neste BoP foram caracterizados conjuntamente máquinas injetoras e moldes visto que os parâmetros de processo destes componentes são interdependentes.

Para desenvolver todas as atividades relacionadas com ambas estratégias foi necessário efetuar uma revisão literária acerca dos equipamentos de injeção, acompanhar todo o processo produtivo e recorrer aos *softwares* de gestão da manutenção (*NetWork*) e de gestão da produção (*NetProd*) desenvolvidos pelo departamento de injeção de plásticos da empresa.

Os resultados desta caracterização irão, posteriormente, ficar associados a um único documento que servirá de referência não só para todas as pessoas que trabalham na área de injeção de plásticos da empresa (operadores, técnicos de manutenção, engenheiros), como também para as que não estão familiarizadas com o processo e aquelas que no futuro possam vir a trabalhar no ramo. Este *Bill of Process* servirá também como um documento base para validações de novos moldes (além do molde alvo de estudo nesta dissertação) e de compreensão de todo o processo desde a entrada da matéria-prima até à saída do produto final.

O *Bill of Process* é apresentado no Anexo A, bem como outras anotações referentes ao mesmo. A elaboração deste tem também como um dos seus principais objetivos servir de referência para a construção das folhas de *setup*, abordadas de seguida.

### 3.2 Folhas de *Setup*

O processo de moldação por injeção é influenciado por um grande número de fatores, como aliás, já foi explicado anteriormente. A correta seleção e discriminação desses mesmos fatores é um passo importante para uma correta otimização do processo, pelo que a elaboração de um documento onde são identificados todos os parâmetros de processo e apontamentos auxiliares a este, se torna indispensável. No ramo da injeção de plásticos, esse documento é denominado por folha de *setup* ou folha de processo.

A folha de *setup* é o primeiro documento gerado aquando da validação do processo associado a um novo molde em início de produção. Assim sendo, esta deve contemplar todos os parâmetros importantes de registo, pois o seu devido preenchimento vai refletir as condições de trabalho a que o molde e a máquina devem estar sujeitos durante o processamento de material plástico. Apesar de poder haver mais que um molde de injeção a produzir peças da mesma família entre si, cada folha de *setup* deve ser respeitante a um (e um só) molde de injeção.



Na área de injeção de plásticos da Delphi Seixal, a utilização de folhas de *setup* não é uma novidade. Para a identificação de todos os parâmetros de entrada e de saída (e outras anotações) associados a cada molde tem sido utilizada a folha de *setup* apresentada no Anexo B. No entanto, foi solicitada a reformulação desse mesmo documento por parte do engenheiro responsável pela área dos plásticos, visto apresentar várias lacunas. O primeiro problema notado é a ausência de distinção entre os *setups* relativos aos moldes que trabalham em máquinas injetoras com unidades de controlo mais recentes e aqueles que funcionam em máquinas com unidades de controlo mais antigas. Outro problema notado na antiga folha de *setup* utilizada é a ausência de registo dos resultados obtidos após a aplicação de um método de validação de moldes.

Para colmatar o primeiro problema referido foram elaboradas duas folhas de *setup* distintas: uma destinada para as máquinas injetoras mais antigas e outra para máquinas injetoras mais recentes (introduzindo as suas novas funcionalidades), tendo por base a distinção feita na construção do BoP relativa às máquinas injetoras e moldes de injeção. Para colmatar o segundo problema, no verso de cada uma destas folhas são apresentados os principais resultados dos estudos que fazem parte da preparação do molde, o controlo estatístico do processo (capabilidades), os gráficos do processo de injeção e da pressão específica de injeção, e ainda um guia de resolução de problemas. Por outro lado, algumas informações que se encontravam disponíveis na antiga folha de *setup* não ocupam lugar nas novas folhas pois tratam-se de informações que estão disponíveis no *NetWork*. Os resultados obtidos da utilização do método de validação servirão como “base” para análise de futuros problemas que possam eventualmente aparecer, permitindo aos técnicos perceberem o conceito de validação de processo e possam atuar de imediato perante alguma situação anómala, possível de ser justificada com fundamento nos resultados da validação.

As novas folhas de *setup* foram construídas após uma pesquisa na literatura, nos manuais das máquinas injetoras e com auxílio do BoP. Após a sua construção, estas foram apresentadas e aprovadas, pelo que foram utilizadas para a preparação de um novo molde presente na empresa, produtor de *Cases*, instalado numa máquina injetora mais recente. Estas folhas estão apresentadas no Anexo C, Anexo D e Anexo E. No Anexo E é apresentado o verso das folhas de *setup*, sendo este comum às duas folhas criadas.

### 3.3 Equipamento e material utilizado

Neste tópico serão apresentados e caracterizados os equipamentos e material utilizados para a moldação das peças estudadas na parte experimental deste trabalho, presentes na área de injeção de plásticos da Delphi Seixal.

#### 3.3.1 Máquina injetora

Todas as peças termoplásticas foram moldadas recorrendo a uma máquina injetora horizontal de parafuso alternativo, ENGEL VC 330/120 Tech (Figura 3.1) com uma unidade de controlo ENGEL CC200. A referência VC 330/120 Tech significa que esta máquina pertence à gama Victory da marca ENGEL, possui uma unidade de injeção com o modelo 330 e uma unidade de fecho com uma força máxima de 120 toneladas (1200 KN). Esta máquina injetora apenas deve ser utilizada para a fabricação de peças cujos materiais sejam termoplásticos, termoendurecíveis ou elastómeros. As suas principais características técnicas, obtidas dos manuais do fabricante, estão apresentadas no Anexo F. Conjuntamente com a máquina injetora operam três equipamentos auxiliares: um desumidificador pneumático Piovan DPA 20, um termorregulador (a água pressurizada) HB-THERM HB-160Z1 SERIES 5 e um alimentador monofásico elétrico Piovan S50. Estes equipamentos são apresentados na Figura 3.2.



a)



b)

**Figura 3.1** – Equipamentos de injeção: **a)** Máquina injetora ENGEL VC 330/120 Tech; **b)** painel de controlo ENGEL CC200



a)



b)

**Figura 3.2** – Equipamentos auxiliares de moldação: **a)** alimentador e desumidificador; **b)** controlador de temperatura do molde

### 3.3.2 Molde de injeção

O molde de injeção utilizado para produzir as peças de estudo e que foi escolhido pela empresa para ser validado com a nova folha de *setup*, tem a referência **N55 Case#6 PLT 461**. Este molde, como a própria referência o indica, é responsável pela produção de *cases* (Figura 3.3), que terão como função servir de revestimento exterior às bobinas de ignição (como referido no Capítulo 1.2.1) que irão operar nos motores N55 da marca alemã BMW. As dimensões destas peças são apresentadas detalhadamente no seu desenho técnico, apresentado no Anexo H.

Este é um molde de três placas, de canais frios, com ataque em bico de alfinete. Este molde possui duas cavidades de moldação (inscritas como cavidades 12 e 13), alimentadas por um canal de injeção central, o que permite a injeção de duas peças por ciclo. As cavidades, machos, postigos e outros componentes secundários foram construídos em aço AISI H13, sujeito a um tratamento térmico de têmpera, que conferiu a este uma dureza de 54 HRC. Este material é habitualmente empregue em moldes para injeção de termoplásticos dado que é fácil de maquinar, possui uma boa resistência ao desgaste, alta tenacidade, resistência mecânica a altas temperaturas e à fadiga térmica e permite obter peças com elevada precisão dimensional. As cavidades e os machos foram também sujeitos a um polimento, com o objetivo de facilitar a extração das peças e proporcionar um bom acabamento superficial a estas. Na Figura 3.4 pode ser visto este molde aberto e fechado.



**Figura 3.3** – Cases extraídas do molde após um ciclo: em baixo, da cavidade 12; em cima, da cavidade 13



**a)**



**b)**

**Figura 3.4** – Molde de injeção N55 Case#6 PLT 461: **a)** aberto; **b)** fechado

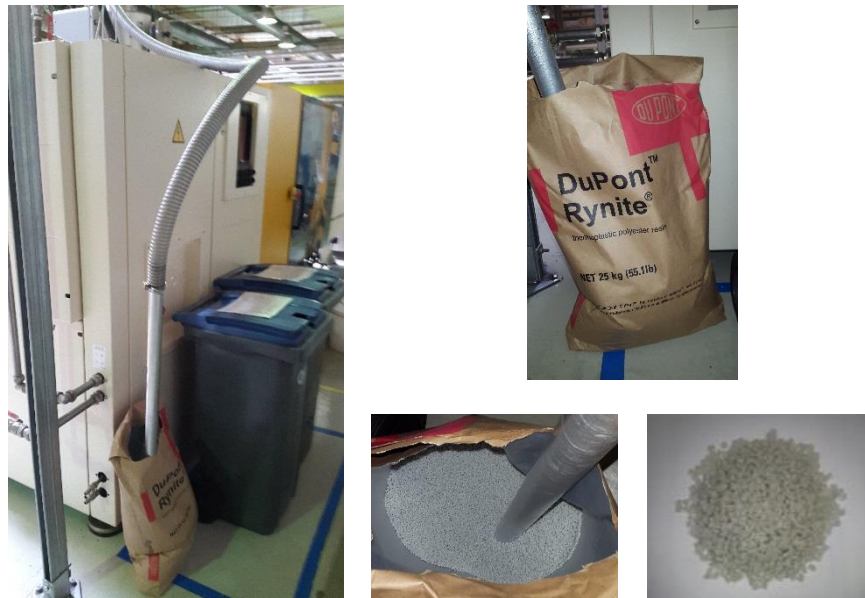
### 3.3.3 Material

O material utilizado para a moldação das peças estudadas é o Rynite® RE5329 NC010 (Figura 3.5). Esta matéria-prima é produzida pela DuPont™, tratando-se de uma resina de poliéster termoplástico baseada no politereftalato de etileno (PET), reforçado com 36% de fibra de vidro e desenvolvido para sistemas de ignição. De todos os materiais utilizados na área de injeção de plásticos da Delphi Seixal, este polímero representa cerca de 70% deles, apresentando as seguintes características [25, 27]:

- É especialmente formulado com fibras de vidro uniformemente dispersas no politereftalato de etileno, o que permite uma rápida cristalização durante o processo de moldação por injeção;

- Sendo um material higroscópico, é necessário proceder à secagem do mesmo antes do seu processamento, com risco de perda das propriedades obtidas após a sua moldação. O uso de desumidificadores é a única maneira prática para se assegurar isto;
- Possui uma excelente estabilidade dimensional e baixos níveis de empeno;
- É um polímero semi-cristalino e, portanto, possui uma temperatura de fusão mais elevada;
- É um material com elevados níveis de força, tenacidade, rigidez e resistência à fluência;
- Tem uma excelente resistência química, térmica e a exposição a radiação UV;
- Boas propriedades elétricas inerentes e estabilidade de cor a altas temperaturas;
- Apresenta excelentes características de escoamento em aplicações com paredes de espessura fina e tolerâncias de processamento apertadas;
- Em moldes multicavidade permite um preenchimento com pressões de injeção sensivelmente mais baixas que as usadas para outros polímeros. Este fator é especialmente vantajoso na fabricação de micro-componentes;
- Adesão a resinas epóxi vazadas.

As principais propriedades do material e os valores de processamento recomendados pelo fabricante são apresentados no Anexo G.



**Figura 3.5** – Material utilizado para moldação de *Cases N55*

### 3.4 Preparação do Molde

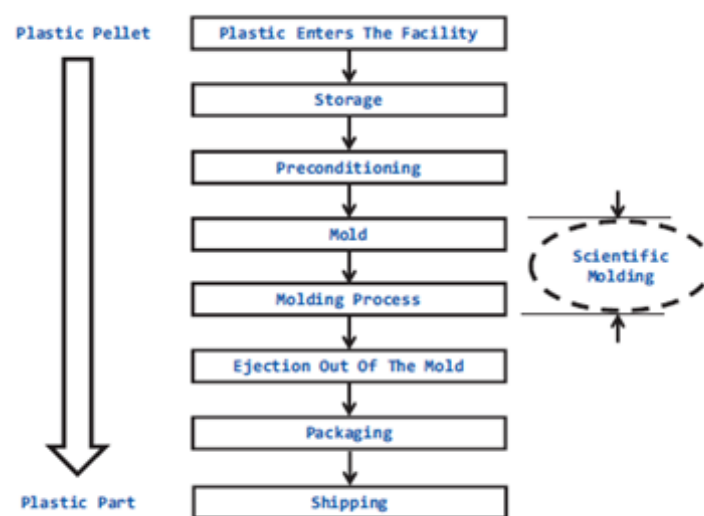
Com a ausência de um método experimental científico apropriado, a validação de *setups* de moldes de injeção é realizada de uma forma arbitrária, recorrendo a metodologias de tentativa-e-erro, o que provoca um desperdício considerável de tempo e material. Atualmente a melhor prática implementada na indústria para preparar e configurar moldes e deste modo compreender um pouco melhor o processo de moldação por injeção é baseada num método experimental designado por moldação científica.

A moldação científica é uma prática industrial utilizada para atingir um controlo ótimo de um processo de moldação por injeção de modo a devolver ciclos de moldação mais rápidos, maiores produções e um processo mais robusto, isto é, um processo afetado minimamente por origens externas de variabilidade. Com a implementação desta metodologia de validação pretende-se também obter uma justificação científica para os parâmetros de processo fulcrais que estão registados em folha de *setup* (velocidade de injeção, segunda pressão, tempo de pós-pressão, tempo de arrefecimento, tempo de ciclo, ...). John Bozelli e Rodney J. Groleau são reconhecidos como os pioneiros e iniciadores da moldação científica.

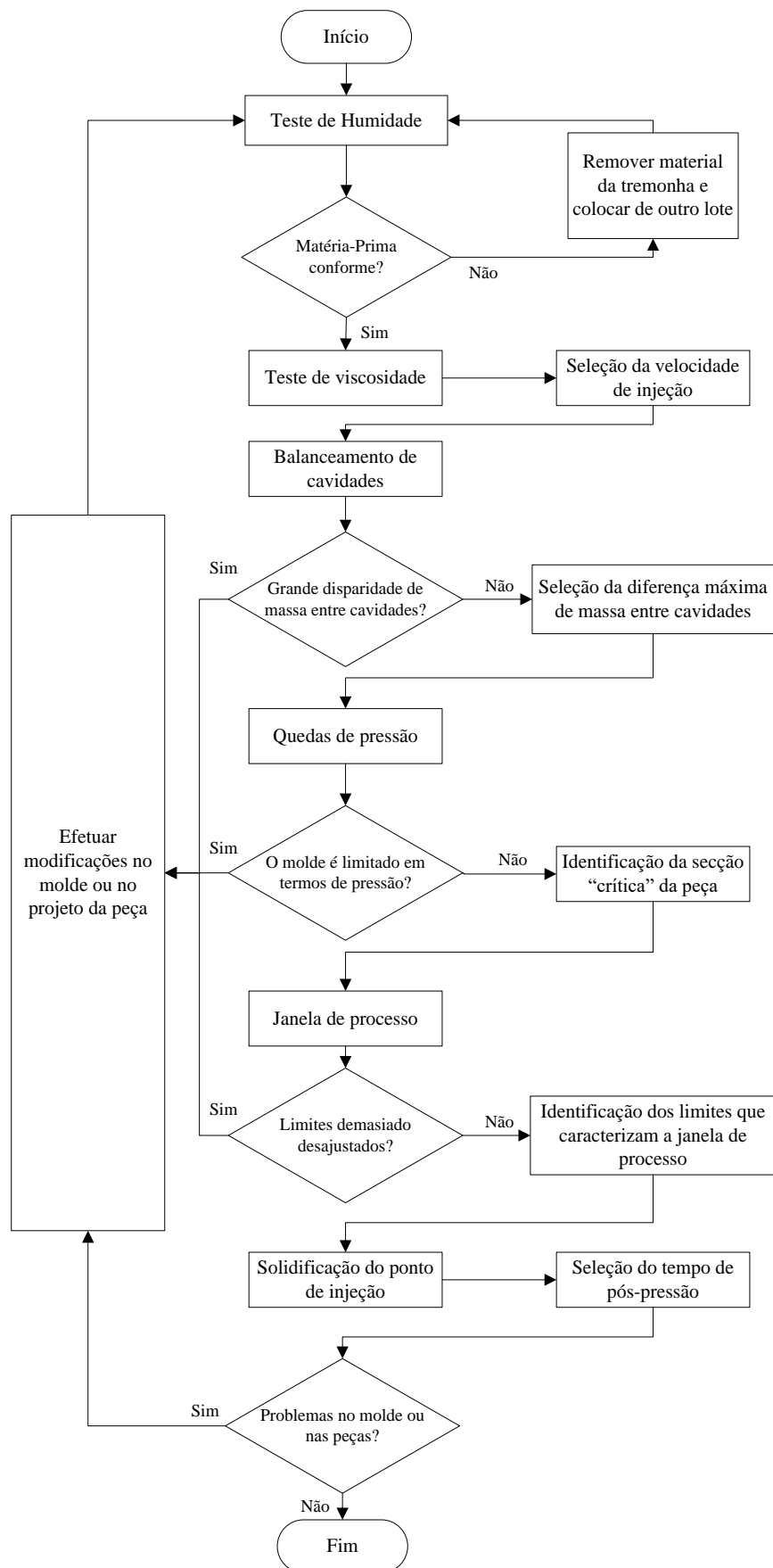
Esta metodologia procura focar-se principalmente no comportamento do material no interior do molde e a sua interação no processo (Figura 3.6) e não na máquina, isto é, caracteriza-se por se focar nos quatro parâmetros básicos e fundamentais do plástico: temperatura, velocidade de injeção, pressão e arrefecimento. Aqui, é menos importante saber o que a máquina faz, como faz e como se comporta, desde que produza repetidamente peças plásticas de qualidade, num ciclo de moldação consistente, tão eficientemente quanto possível. Quer-se com isto dizer que segundo a moldação científica, a injetora é apenas uma ferramenta utilizada para moldar plástico fundido para uma forma, não se dando foco aos *setpoints* desta porque os parâmetros são definidos para cada molde e material específicos. Ao implementar esta estratégia torna-se imperativo separar o controlo da fase de injeção da fase de pressurização, isto é, dissociar o processo de injeção do processo de pressurização. Como tal, a moldação científica é também denominada moldação dissociada [13, 28, 29].

Os princípios da moldação científica são postos em prática através do estudo dos “6 passos” (*the 6-step study*) apresentado por Kulkarni [1]. Na Figura 3.7 é apresentado o fluxograma que ilustra o procedimento geral da preparação do molde N55 Case#6 PLT 461, o qual teve por base o referido estudo. Como se pode verificar no fluxograma representado, previamente à realização dos testes de preparação do molde foi necessário efetuar um teste para averiguar a percentagem de humidade presente na matéria-prima utilizada. Com esta avaliação pretende-se garantir que as peças extraídas não possuam defeitos que possam estar intrinsecamente relacionados com humidade excessiva e que não seja necessário numa fase posterior corrigir parâmetros que interferem em todas as etapas do

processo. Recorrendo a um analisador de humidade METTLER TOLEDO Excellence Plus HX204 presente no Laboratório de Qualidade do departamento de injeção de plásticos da Delphi Seixal (Figura 3.8), foi analisada uma amostra de Rynite RE5329 NC010 retirada do interior da tremonha presente na máquina injetora em que se efetuaram os testes de validação (60 minutos após ter sido ligado o desumidificador). Obteve-se um valor de humidade relativa de 0,013%, inferior aquele referido nas especificações técnicas do material ( $\leq 0,02\%$ ). Como tal, concluiu-se que a matéria-prima se encontrava em boas condições para ser processada e que se podia prosseguir para a realização dos testes de preparação do molde.

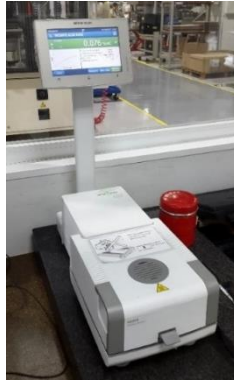


**Figura 3.6** – Enquadramento da moldação científica no processamento de material polimérico (Adaptado de [1])



**Figura 3.7** – Fluxograma ilustrativo do procedimento de preparação do molde N55 Case#6 PLT 461





**Figura 3.8** – Analisador de humidade METTLER TOLEDO Excellence Plus HX204

### **3.4.1 Estudo reológico – Teste de viscosidade**

O teste de viscosidade tem como objetivos definir a velocidade de injeção que minimiza a variação de viscosidade devido a alguma hesitação por parte da unidade de injeção e tentar maximizar a consistência de máquina para máquina no processo de injeção. De modo a realizar-se este estudo foi adotado o seguinte procedimento:

- Definição da temperatura do material de acordo com a recomendada pelo fabricante. Se houver uma gama de temperaturas, definir a temperatura para o centro dessa gama;
- Colocação a zero de todos os parâmetros de pós-pressão (o teste realiza-se apenas na fase de injeção);
- Definição do tempo de pausa para dosagem (Z3) igual ao tempo de solidificação do ponto de injeção (6 s), tendo por base outros moldes que produzam as mesmas peças;
- Definição da pressão hidráulica para o máximo valor disponível (130 bar);
- Definição de um valor seguro para o tempo de arrefecimento, de modo a que a peça arrefeça, não sofra distorções e atinja a temperatura de extração antes de o molde abrir (com base em moldes que produzem a mesma família de peças);
- Alteração da posição do fuso para a posição de comutação e estabelecimento de uma baixa velocidade de injeção (35 mm/s) de modo a que a peça tenha uma baixa taxa de enchimento;
- Registo do pico de pressão de injeção (PVs) e do tempo de injeção (ZSx);
- Aumento incremental (em pequenos passos) da velocidade de injeção até perto do máximo, garantindo que as peças continuam com uma baixa % de enchimento (95-98%). Para cada velocidade registar os valores do pico de pressão hidráulica e do tempo de injeção.

No total foram estudadas 11 velocidades de injeção diferentes, cujas peças extraídas de uma das cavidades do molde são apresentadas na Figura 3.9. Para além do pico de pressão hidráulica e do tempo de injeção foram ainda registados o curso do fuso (C1) e o curso de comutação (C3). A diferença destes dois últimos corresponde, em termos volumétricos, ao volume de dosagem (VS) que se traduz nessa mesma diferença (C1-C3) multiplicada pela área do fuso. Para este efeito, o volume de dosagem será apenas dado como a diferença entre C1 e C3. Este parâmetro deve ser obtido aquando da realização do teste de viscosidade e deve permanecer constante durante o tempo de vida do molde, pois trata-se de um parâmetro fulcral para manter a consistência do processo no caso de ser introduzido um fuso com diâmetro diferente ou que o molde seja instalado noutra máquina injetora.



**Figura 3.9** – Peças obtidas após a realização do estudo reológico e respetiva progressão do enchimento das mesmas com o aumento da velocidade de injeção

A seleção da velocidade de injeção foi realizada através da análise do gráfico da viscosidade em função das velocidades de injeção estudadas (conhecido como curva de viscosidade ou curva reológica). Para tal, foi necessário efetuar o cálculo da viscosidade para cada velocidade de injeção, tendo em conta os valores dos dois parâmetros registados e a taxa de intensificação do fuso da máquina, tal como se verifica na expressão 3.1.

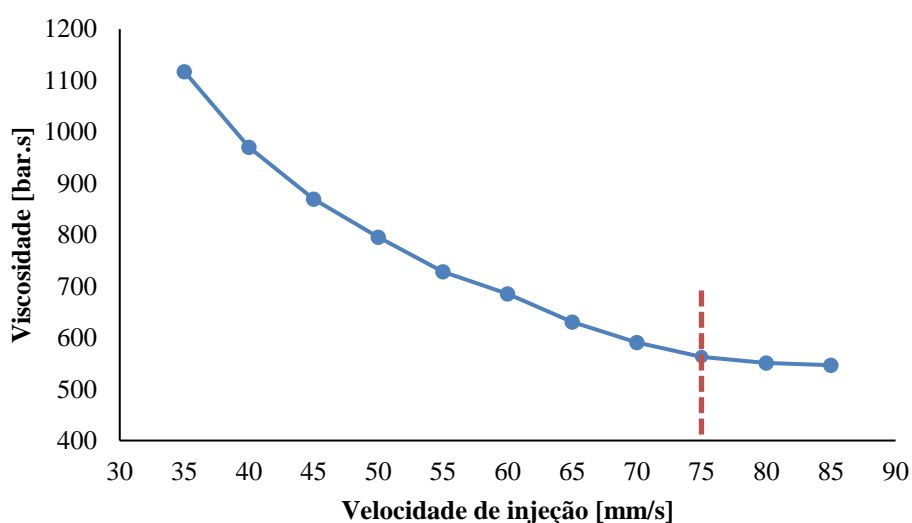
$$\text{Viscosidade} = \text{Pico de pressão hidráulica} \times \text{Tempo de injeção} \times IR_{fuso} \quad (3.1)$$

Na Tabela 3.1 são apresentados os valores do pico de pressão de pressão hidráulica, do tempo de injeção e da viscosidade, sendo que para o cálculo deste último foi utilizada uma taxa de intensificação de 10 (IR=10). Observando os valores registados nessa mesma tabela verifica-se uma diminuição da viscosidade com o aumento da velocidade de injeção. Para além da conjugação dos efeitos da pressão hidráulica e do tempo de injeção contribuírem para uma diminuição da viscosidade, tal efeito é também justificado pelo aumento da temperatura das superfícies moldantes provocado por um aumento da velocidade de injeção.

Com base nos valores da Tabela 3.1 foi projetada a curva de viscosidade do molde N55 Case#6 PLT 461 (Figura 3.10). Tendo como referência os resultados obtidos por Mertes *et al.* [30] que confirmam a hipótese teórica de que velocidades de enchimento maiores resultam em processos mais consistentes e atenuam perturbações melhor que velocidades mais baixas, foi selecionada uma velocidade de injeção de 75 mm/s. Foi considerada esta velocidade e não uma superior pois o molde de injeção é recente e a seleção de uma velocidade superior implicaria um maior desgaste das suas superfícies moldantes. Para além disto, observando a curva reológica obtida verifica-se que é a partir desta velocidade que existe uma estabilização da viscosidade.

**Tabela 3.1** – Dados registados do teste de viscosidade

Ensaio	Velocidade de injeção [mm/s]	Pico de pressão hidráulica [bar]	Tempo de injeção [s]	Viscosidade [bar.s]
1	35	93,9	1,19	1117,41
2	40	92,4	1,05	970,20
3	45	92,5	0,94	869,50
4	50	93,6	0,85	795,60
5	55	93,4	0,78	728,52
6	60	95,2	0,72	685,44
7	65	95,5	0,66	630,30
8	70	95,3	0,62	590,86
9	75	95,4	0,59	562,86
10	80	96,6	0,57	550,62
11	85	97,6	0,56	546,56



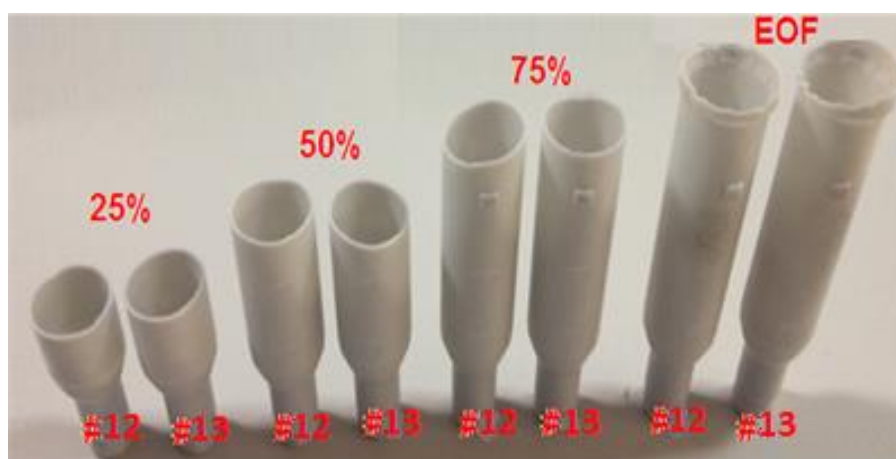
**Figura 3.10** – Curva reológica do molde N55 Case#6 PLT 461

### 3.4.2 Estudo do balanceamento de cavidades

O estudo do balanceamento de cavidades tem como objetivo minimizar as variações de massa entre cavidades devido a injeções desequilibradas. Como já foi referido, o molde de estudo possui duas cavidades, inscritas como cavidades 12 e 13. A realização deste estudo seguiu o procedimento descrito de seguida:

- Colocação a zero dos parâmetros de pós-pressão (tal como o estudo anterior, realiza-se apenas na fase de injeção);
- Definição do tempo de pausa para dosagem (Z3) igual ao tempo de pós-pressão esperado, tal como efetuado para o estudo reológico;
- Definição do tempo de arrefecimento para um valor que garanta a ausência de distorções na peça no momento da sua extração do molde;
- Definição da velocidade de injeção para o valor obtido do teste de viscosidade (75 mm/s);
- Moldação de peças com taxas de enchimento diferentes (aproximadamente 25%, 50%, 75% e *end of fill*) ajustando apenas a posição de comutação, de modo a determinar a diferença máxima de massa entre as cavidades;
- Para cada taxa de enchimento e após um período de estabilização do processo (tipicamente 3 ciclos), recolher 5 peças de cavidade e posteriormente registar a massa das mesmas.

Na Figura 3.11 é apresentada uma peça obtida de cada cavidade para cada uma das 4 taxas de enchimento analisadas.



**Figura 3.11** – *Cases* obtidas do estudo do balanceamento de cavidades para cada taxa de enchimento

Na Tabela 3.2 e na Tabela 3.3 são apresentadas as massas das peças recolhidas de cada cavidade e a respetiva diferença em termos absolutos e percentual para cada uma das taxas de enchimento estudadas. Na Tabela 3.4 são apresentadas, para cada taxa de enchimento, as médias da massa das peças para cada cavidade e a respetiva diferença percentual.

**Tabela 3.2** – Diferença de massa entre cavidades para taxas de enchimento de 25% e 50%

25%				50%			
Cav. 12 [g]	Cav. 13 [g]	Δ Cav. [g]	% Diferença	Cav. 12 [g]	Cav. 13 [g]	Δ Cav. [g]	% Diferença
8,2845	8,3060	0,0215	2,15	9,8213	9,8237	0,0024	0,24
8,1042	8,0942	0,0100	1,00	9,7057	9,6942	0,0115	1,15
8,1791	8,1583	0,0208	2,08	9,5803	9,5897	0,0094	0,94
8,0231	8,0201	0,0030	0,30	9,7165	9,7246	0,0081	0,81
8,0200	8,0195	0,0005	0,05	9,7030	9,6978	0,0052	0,52

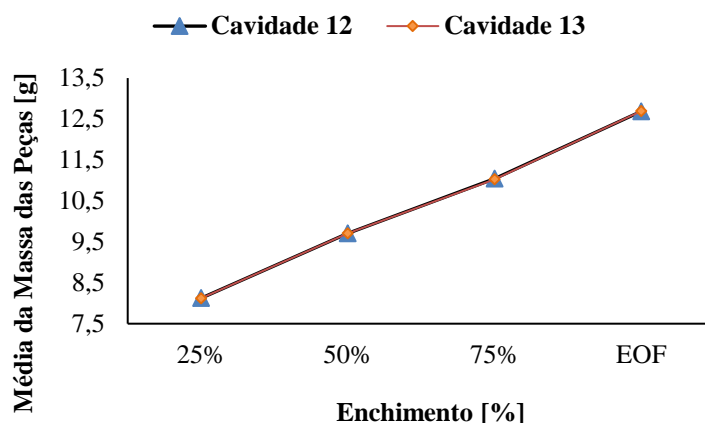
**Tabela 3.3** - Diferença de massa entre cavidades para taxas de enchimento de 75% e *end of fill* (EOF)

75%				EOF			
Cav. 12 [g]	Cav. 13 [g]	Δ Cav. [g]	% Diferença	Cav. 12 [g]	Cav. 13 [g]	Δ Cav. [g]	% Diferença
11,0530	11,0310	0,0220	2,20	12,7701	12,7728	0,0027	0,27
11,0957	11,0794	0,0163	1,63	12,6906	12,6804	0,0102	1,02
10,9522	10,9490	0,0032	0,32	12,7408	12,7554	0,0146	1,46
11,0462	11,0330	0,0132	1,32	12,6204	12,6371	0,0167	1,67
11,0772	11,0540	0,0232	2,32	12,6034	12,6094	0,0060	0,60

**Tabela 3.4** – Média da massa das peças estudadas e respetivas diferenças entre cavidades

Taxa de enchimento	Média Massa Cav. 12 [g]	Média Massa Cav. 13 [g]	Δ Cav. [g]	% Diferença
25%	8,1222	8,1196	0,0026	0,26
50%	9,7054	9,7096	0,0006	0,06
75%	11,0449	11,0293	0,0156	1,56
EOF (95-98%)	12,6851	12,6910	0,0060	0,60

Tendo por base os dados da Tabela 3.4 foi elaborado um gráfico da média da massa das peças em função da taxa de enchimento, para cada cavidade (Figura 3.12). Enquanto este molde produzir peças, a diferença de massa entre cavidades deve ser menor que a maior diferença observada entre as retas do gráfico. Caso se verifique uma diferença muito díspar, o molde deve ser retificado pelo fabricante e ainda garantido que o arrefecimento e o procedimento do teste de viscosidade são os mais corretos. Foi registada uma diferença máxima entre cavidades de 0,0156 g (1,56%) para uma taxa de enchimento de 75%.



**Figura 3.12** – Gráfico do estudo do balanceamento de cavidades

### 3.4.3 Estudo da queda de pressão

O objetivo principal do estudo da queda de pressão é determinar a secção da peça onde ocorre uma maior queda de pressão, de modo a garantir que essa zona é alvo de maior atenção quando gerado o perfil de queda de pressão. Pretende-se também garantir que o processo de injeção não seja limitado em termos de pressão, o que pode provocar hesitações por parte da unidade de injeção (o fuso não é capaz de manter a velocidade de injeção estabelecida). Foi adotado o seguinte procedimento:

- Definição das temperaturas de processamento da máquina (molde e cilindro), tempo de pausa para dosagem, tempo de arrefecimento, parâmetros de pós-pressão e restantes parâmetros de processo de igual modo ao estabelecido nos testes anteriores;
- Definição da velocidade de injeção para o valor obtido do estudo reológico;
- Definição da pressão hidráulica para a máxima disponível (130 bar);
- Ajuste da posição de comutação de modo a moldar peças com uma taxa de enchimento entre 95 e 98% da sua totalidade (*end of fill*). Registo do respetivo pico de pressão hidráulica (PVs) após a garantia da existência de ciclos de moldação estabilizados;

- Moldação de *cases* com cerca de 75% do seu volume total e registo do respetivo pico de pressão hidráulica;
- Repetição do procedimento anterior, mas para cerca de 15% do volume total das moldações;
- Ajuste da posição de comutação para obtenção de cerca de 5% do volume total das moldações, ou seja, para obtenção do sistema de alimentação (canal de injeção, canais de alimentação e pontos de injeção) e registo do pico de pressão hidráulica após um período de estabilização do processo;
- Realização de uma injeção apenas com ar (dosagem sem material) e anotação do pico de pressão hidráulica obtido.

Antes de iniciar este estudo foi testada a possibilidade de moldação separada do canal de injeção, do canal de injeção juntamente com o canal de alimentação principal e ainda do canal de injeção juntamente com todos os canais de alimentação (principais e secundários) para posterior análise das quedas de pressão em cada uma destas secções. Contudo, verificou-se que os elementos do sistema de alimentação ficavam encravados entre as placas do molde após a sua abertura ou possuíam uma dimensão pequena demais para poderem ser ejetados, pelo que se optou por estudar as secções referidas no procedimento e que podem ser observadas na Figura 3.13.

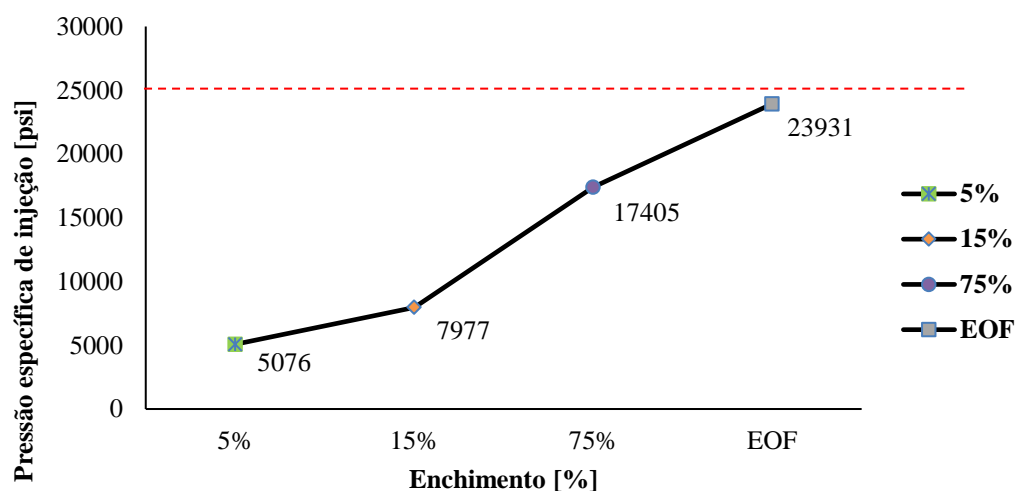


**Figura 3.13** – Peças obtidas do estudo da queda de pressão

O registo do pico de pressão hidráulica e respetiva pressão específica de injeção para cada taxa de enchimento estudada são apresentados na Tabela 3.5. Com base nesses mesmos dados foi concebido o perfil de queda de pressão do molde (Figura 3.14).

**Tabela 3.5** – Dados obtidos do estudo da queda de pressão

Taxa de enchimento	Pico de pressão hidráulica [bar]	Pressão específica de injeção [bar]	Pressão específica de injeção [psi]
5%	19,5	350	5076
15%	38,5	550	7977
75%	90,1	1200	17405
EOF (95-98%)	119,2	1650	23931
Pressão máxima	130	1800	26107

**Figura 3.14** – Perfil de queda de pressão do molde N55 Case#6 PLT 461

Na Tabela 3.6 são apresentados os valores da queda de pressão obtidos entre cada secção estudada. Como se pode verificar, a maior queda de pressão ocorre na zona de enchimento de 15% a 75% da peça, sendo estas as secções que devem ser alvo de maior atenção. Nota-se ainda que existe uma margem confortável entre o valor máximo de pressão disponibilizado pela máquina injetora e o valor obtido para a zona de final de enchimento. Esta diferença deve ser suficiente para suportar a pressão que ainda tem de ser exercida na fase de pressurização. Se por algum motivo o processo for limitado em termos de pressão, este deve ser retificado, em particular, nas zonas onde se verificam as maiores quedas de pressão.



**Tabela 3.6** – Quedas de pressão obtidas para cada secção de análise

Secção de análise	Pico de pressão hidráulica [bar]	% Máximo	$\Delta P$ [bar]	% $\Delta P$
Canais Alimentação	19,5	15	19,5	15
15% Peça	38,5	29,62	19	14,6
75% Peça	90,1	69,31	51,6	39,7
EOF	119,2	91,69	29,1	22,4
Máximo	130	100	10,8	8,3

### 3.4.4 Estudo da janela de processo

O estudo da janela de processo (também conhecida como diagrama da área de moldação ou janela de processo cosmética) tem por finalidade definir os limites da pós-pressão e da temperatura do molde, dentro dos quais as peças produzidas são cosmeticamente aceitáveis. Segundo Kulkarni [1], o procedimento referente a este estudo é distinto para materiais amorfos e cristalinos. No entanto, na empresa apenas é seguido o procedimento referente a materiais cristalinos porque durante o processamento de materiais amorfos, ao fazer variar a temperatura do material este apresenta um comportamento não-linear, podendo originar diversos problemas nas peças produzidas. O procedimento adotado para este estudo é apresentado de seguida:

- Definição da temperatura do material para o centro da gama de valores recomendados pelo fabricante ou para o valor ótimo, se disponível (285 °C) e da temperatura do molde para o valor desejado no processamento de materiais cristalinos (140 °C);
- Definição da velocidade de injeção para o valor obtido no estudo reológico (75 mm/s) e dos parâmetros de pós-pressão como nulos;
- Seleção do tempo de pausa para dosagem (Z3) igual ao tempo de pós-pressão esperado, tal como efetuado para os estudos anteriores e de um tempo de arrefecimento superior ao tipicamente necessário para as peças em causa (10 s);
- Início da moldação de peças com uma taxa de enchimento entre 95 e 98% da sua totalidade, após ajuste da posição de comutação;
- Moldação de 10 peças depois de garantida a estabilização das condições do processo;
- Definição do tempo de pós-pressão esperado para o molde, de modo a que se garanta a solidificação dos pontos de injeção (com base na experiência);

- Aumento da pós-pressão em pequenos incrementos (de 10 bar) até se obterem peças esteticamente aceitáveis;
- Continuação do aumento da segunda pressão (em incrementos iguais) até se verificar novamente a presença de defeitos visuais;
- Registo de todos os resultados para definição do diagrama da área de moldação para o molde estudado.

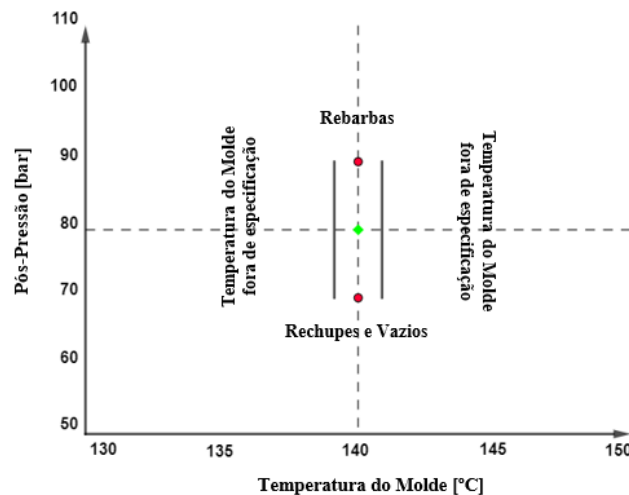
**Tabela 3.7** – Dados obtidos do estudo da janela de processo

Temperatura do Molde [°C]	Pós-Pressão [bar]	Observações
140	0	<b>NOK</b> > Peças não preenchidas > Peças com vazios internos e externos > Peças com fissuras no lado HV
	10	<b>NOK</b> > Peças não preenchidas > Peças com vazios internos e externos > Peças com fissuras no lado HV
	20	<b>NOK</b> > Peças com vazios internos e externos > Peças com fissuras no lado HV
	30	<b>NOK</b> > Peças com vazios internos e externos
	40	<b>NOK</b> > Peças com vazios internos (torre)
	50	<b>NOK</b> > Peças com vazios internos (torre)
	60	<b>NOK</b> > Peças com vazios internos (torre)
	70	<b>OK</b> > Peças aceitáveis
	80	<b>OK</b> > Peças aceitáveis
	90	<b>OK</b> > Peças aceitáveis
	100	<b>OK</b> > Peças aceitáveis
	110	<b>NOK</b> > Peças com rebarba na linha de separação

(**NOK** – não conforme; **OK** – conforme)

Com base nos dados da Tabela 3.7, as peças recolhidas sujeitas a uma pós-pressão de 100 bar são aceitáveis. No entanto, o valor máximo de pós-pressão a ser utilizado no molde N55 Case#6 PLT 461 será de 90 bar por questões de segurança devido às folgas existentes por o molde ser recente. De modo a garantir que em eventuais variações do processo se produzam peças

cosmeticamente aceitáveis, o molde deve operar, sempre que possível, com valores de pós-pressão e temperatura de molde referentes aos do centro da janela de processo (80 bar, 140 °C) onde, teoricamente, os atributos qualitativos são ótimos. Na Figura 3.15 está representada a janela de processo do molde de estudo.



**Figura 3.15** – Janela de processo cosmética do molde N55 Case#6 PLT 461

### 3.4.5 Estudo da solidificação do ponto de injeção

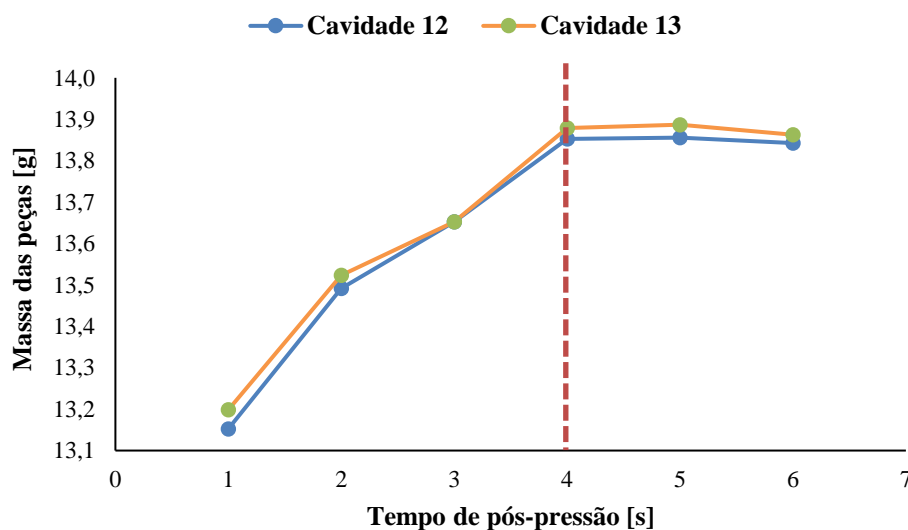
O objetivo principal deste estudo é determinar o tempo de pós-pressão necessário para solidificar o ponto de injeção e a partir do qual se torna desnecessário continuar a comprimir material para o interior da cavidade. A realização deste estudo seguiu o procedimento descrito de seguida:

- Definição da velocidade de injeção para o valor obtido no teste de viscosidade;
- Definição da temperatura do molde em 140 °C e da segunda pressão em 80 bar, valores correspondentes ao centro da janela de processo obtida no teste anterior;
- Estabelecimento do tempo de arrefecimento em 8 segundos, tal como já havia sido considerado;
- Definição do tempo de pós-pressão como nulo e do tempo de pausa para dosagem para o valor considerado no teste de viscosidade (6 s);
- Início da injeção de peças, recolhendo uma moldação de cada cavidade após um período de estabilização do processo;
- Aumento do tempo de pós-pressão para 1 s e recolha de uma peça de cada cavidade;

- Aumento do tempo de pós-pressão em incrementos de 1 s, até atingir a produção de peças sujeitas a um tempo de 6 s. Recolha de uma moldação de cada cavidade para cada tempo estudado;
- Mensuração da massa de todas as peças recolhidas de cada cavidade, para cada tempo estudado (Tabela 3.8) e representação num gráfico “Massa das peças vs Tempo de pós-pressão” (Figura 3.16).

**Tabela 3.8** – Dados obtidos do estudo da solidificação dos pontos de injeção

Tempo de Pós-Pressão [s]	Massa Peças Cav. 12 [g]	Massa Peças Cav. 13 [g]
1	13,1525	13,1990
2	13,4912	13,5240
3	13,6522	13,6520
4	13,8523	13,8785
5	13,8556	13,8868
6	13,8425	13,8623



**Figura 3.16** – Gráfico massa das peças em função do tempo de pós- pressão

Após uma análise do gráfico da figura anterior, verificou-se uma estabilização da massa das peças de ambas as cavidades a partir de 4 s. Este tempo foi registado como o tempo de solidificação dos pontos de injeção do molde N55 Case#6 PLT 461 pois é aquele a partir do qual a massa das peças permanece constante, dado que o plástico não consegue entrar ou sair da cavidade.

### 3.4.6 Estudo do tempo de arrefecimento

O último estudo efetuado na preparação de um molde de injeção é o estudo do tempo de arrefecimento que tem como objetivo definir o tempo necessário para que as peças moldadas atinjam a estabilidade dimensional requerida antes da sua extração do molde de injeção. Este é o estudo mais moroso, pois para além da máquina injetora é necessária ainda a utilização de uma máquina de medição por coordenadas. Uma vez que este estudo não foi possível de ser realizado, o tempo de arrefecimento utilizado foi aquele que é utilizado nos restantes moldes que produzem o mesmo tipo de peças (8 segundos). Contudo, o procedimento a ser adotado para realizar o último dos testes contemplados no estudo dos 6 passos é apresentado de seguida:

- Definição das condições de processo determinadas pelos estudos anteriores (nomeadamente, teste de viscosidade, janela de processo e solidificação do ponto de injeção);
- Definição das dimensões críticas da peça, isto é, as dimensões que tendem a sofrer alterações com o tempo de arrefecimento;
- Moldação de peças sem tempo de arrefecimento e registo do valor obtido para cada dimensão crítica (depois de verificada uma estabilização do processo);
- Aumento do tempo de arrefecimento em 1 segundo entre cada medição. Registo dos valores das dimensões críticas em causa para as peças correspondentes a cada incremento de tempo;
- Projeção do gráfico “Dimensão Crítica versus Tempo de Arrefecimento” para cada uma das dimensões críticas consideradas. Após a análise do comportamento de cada dimensão com o tempo de arrefecimento, selecionar o tempo de arrefecimento que melhor se adequa;
- Moldação de peças (as que se acharem necessárias) com o tempo de arrefecimento escolhido e realização de uma análise estatística para determinar a capacidade do processo com esse tempo de arrefecimento.

### 3.5 Desenho de Experiências (DOE) e Metodologia da Superfície de Resposta (RSM)

Habitualmente, um processo produtivo pode ser observado como uma combinação de operações, máquinas, métodos, pessoas e outros recursos que transformam entradas (*inputs*) em saídas (*outputs*). As entradas correspondem a fatores que podem ser controláveis (variáveis de processo como pressões, temperaturas, velocidades) ou não controláveis (variações na matéria-prima, condições ambientais como temperatura e humidade) e as saídas a características de desempenho ou de qualidade (denominadas respostas), as quais devem satisfazer o cliente [31, 32]. Um processo produtivo pode ser representado pelo modelo apresentado na Figura 3.17.

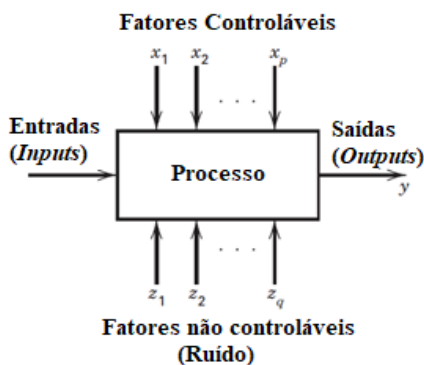
Nos dias de hoje, o nível de exigência dos consumidores é bastante elevado, o que faz com que as empresas do setor automóvel se tornem mais competitivas, utilizando equipamentos mais complexos e materiais com maiores áreas de aplicação. Para além disto torna-se absolutamente indispensável a utilização de ferramentas estatísticas que otimizem o processo produtivo para fazer face a estas necessidades. O Desenho de Experiências (*DOE*) associado à Metodologia de Taguchi ou à Metodologia da Superfície de Resposta (*RSM*) são apenas dois exemplos destas ferramentas estatísticas.

O Desenho de Experiências (*Design of Experiments*), também conhecido como planeamento de experiências, é uma técnica estatística utilizada para analisar dados provenientes de experiências de modo a obter conclusões válidas e objetivas acerca da caracterização de um processo produtivo. Para tal efetuam-se, de forma propositada, alterações de certos parâmetros de processo (os fatores) para observar as mudanças que ocorrem na(s) característica(s) da unidade experimental (componente ou entidade em que é feita a medição da característica da qualidade), procurando identificar as respetivas causas e construir modelos matemáticos que descrevam o processo com o propósito de o monitorizar e melhorar [32, 33].

O valor que os fatores assumem é designado por nível, podendo este ter um carácter qualitativo ou quantitativo. A alteração observada na resposta quando o fator muda de nível é denominada por efeito.

Os três princípios básicos do Desenho de Experiências são: a aleatoriedade, a replicação e a utilização de blocos. A aleatoriedade é obtida através da realização de experiências sem seguir uma ordem definida como a ordem padrão e é fundamental para garantir a validade dos resultados, uma vez que as observações e/ou erros devem ser variáveis aleatoriamente distribuídas. A replicação consiste na repetição de uma experiência, tendo duas importantes propriedades: em primeiro lugar, permite a obtenção de uma estimativa do erro experimental e, por sua vez, verificar quais são as variáveis cujos efeitos são significativos; em segundo lugar, se for utilizada a média experimental

para estimar o efeito de um fator, obtém-se uma estimativa mais precisa com um maior número de replicações. A utilização de blocos é uma técnica que permite reduzir ou eliminar fontes de variabilidade externa e, por sua vez, aumentar a precisão quando se pretendem comparar os diferentes fatores do processo [31].



**Figura 3.17** – Modelo geral de um processo produtivo (Adaptado de [31])

A utilização de métodos estatísticos na experimentação implica um conhecimento prévio do processo a estudar por parte de todos os envolvidos na experiência de forma a identificar o que deve ser estudado e de que forma os dados deverão ser recolhidos e analisados. Como tal, Montgomery [31] enumera os principais passos que devem compor qualquer planeamento de experiências (Tabela 3.9).

**Tabela 3.9** – Procedimento para a realização de um DOE [31]

1. Reconhecimento e definição do problema	} Planeamento pré-experimental
2. Seleção da variável de resposta <sup>a</sup>	
3. Escolha de fatores e níveis <sup>a</sup>	
4. Escolha do Desenho de Experiências	
5. Execução das experiências	
6. Análise estatística dos dados	
7. Conclusões e recomendações	

<sup>a</sup> Na prática, os passos 2 e 3 são feitos simultaneamente ou em ordem inversa

Tendo em conta que nesta dissertação se pretende estudar o efeito dos parâmetros de pressurização na qualidade de uma peça termoplástica, numa primeira abordagem do Desenho de Experiências este terá em conta dois fatores controláveis (pós-pressão e tempo de pós-pressão), com três níveis quantitativos cada e serão observados os efeitos destes na resposta quando os fatores mudarem de nível.

A Metodologia da Superfície de Resposta (RSM) consiste num conjunto de técnicas estatísticas e matemáticas usadas para modelar e analisar problemas nos quais uma ou mais respostas são influenciadas por um conjunto de variáveis de entrada. Estas técnicas estatísticas e matemáticas consistem no planeamento experimental e na subsequente análise dos resultados experimentais que resultam na construção de modelos empíricos. Tipicamente, o objetivo desta metodologia passa por descobrir as melhores condições (níveis) para as variáveis de entrada (fatores) que otimizem as respostas de estudo através da sua maximização ou minimização. Caso não seja possível descobrir os valores que otimizem a resposta em estudo por estar além dos recursos disponíveis à realização das experiências, então esta metodologia é usada para, pelo menos, ganhar um maior conhecimento do sistema de resposta em geral [31, 34].

Considerando um produto, processo ou sistema no qual uma resposta  $y$  depende de  $k$  variáveis de entrada controláveis, a relação entre estas pode ser definida pela equação 3.1.

$$y = \eta + \varepsilon \quad (3.1)$$

onde

$$\eta = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (3.2)$$

representa a superfície de resposta do sistema. A forma da função de resposta  $f$  é desconhecida e tem um erro estatístico associado ( $\varepsilon$ ) que representa as fontes de variabilidade não contabilizadas na função  $f$  e que se assume como tendo uma distribuição normal com média zero e variância  $\sigma^2$ . Ao recorrer a esta metodologia, as variáveis naturais, expressas em unidades mensuráveis como graus Celsius (°C) e quilograma (kg) são transformadas em variáveis codificadas que são adimensionais, com média zero e a mesma propagação do desvio-padrão [34, 35].

Box e Draper [36] definiram um conjunto de propriedades desejáveis num planeamento de experiências aplicado para obtenção de uma superfície de resposta. É de notar que é importante que um planeamento experimental verifique o máximo número de características possível. No entanto, dependendo das circunstâncias experimentais, há propriedades que são fundamentais e então essas devem ser acauteladas. Assim, o planeamento deve:

- Gerar uma distribuição satisfatória do comportamento da resposta ao longo da região de interesse (rotatividade);
- Assegurar que o valor ajustado da resposta seja tão próximo quanto possível do valor verdadeiro;
- Ter boa capacidade para detetar falta de ajuste;
- Permitir que as transformações possam ser estimadas;



- Permitir que as experiências sejam realizadas em blocos;
- Permitir uma construção sequencial de planeamentos de ordens superiores a partir de planeamentos simples;
- Providenciar uma estimativa interna do erro;
- Ser insensível a observações externas e a violação dos pressupostos teóricos;
- Requer um número mínimo de ensaios experimentais;
- Fornecer padrões de dados simples que permitam a apreciação visual imediata;
- Garantir simplicidade de cálculo;
- Reagir bem quando ocorrem erros na definição das variáveis de entrada;
- Não requer um grande número de níveis das variáveis de entrada;
- Verificação do pressuposto de “constância da variância”.

Neste contexto, o RSM é aplicável e, portanto, o objetivo passa pela obtenção de um conhecimento da resposta global do sistema, a fim de quantificar a relação entre os valores das variáveis de resposta (mensuráveis) e os valores relativos ao conjunto de fatores experimentais que presumivelmente afetam a resposta [37].

Sendo desconhecida a relação entre a resposta e as variáveis de entrada controláveis, a primeira abordagem passa por achar uma aproximação adequada, usando polinómios de ordem baixa (primeira ou segunda ordem). O modelo de primeira ordem, também conhecido por modelo linear é apropriado para aproximar a superfície de resposta numa região relativamente pequena do domínio das variáveis independentes, longe da região ótima da superfície e no qual a função  $\eta$  tem uma curvatura pequena. Os Desenhos de Experiências que ajustam os modelos de primeira ordem são tipicamente Desenhos de Experiências fatoriais a dois níveis, sendo que os mais usuais são o planeamento fatorial completo  $2^k$ , o planeamento fatorial fracionado  $2^{k-q}$  e o planeamento Plackett-Burman. A superfície de resposta obtida pelo modelo linear que considera os efeitos principais entre as variáveis e as suas interações é representada por uma regressão linear múltipla [34, 35]:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i < j} \sum_j \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (3.3)$$

onde  $y$  é a resposta do processo,  $x_i$  e  $x_j$  são as variáveis de controlo (representam os níveis de cada fator),  $\beta_0$ ,  $\beta_i$  e  $\beta_{ij}$  são os coeficientes do polinómio (estimados pelo método dos mínimos quadrados) e  $\varepsilon$  o erro observado na resposta. O termo  $x_i x_j$ , que representa a interação entre as variáveis é

adicionado com o objetivo de considerar os possíveis efeitos cruzados entre as variáveis e adicionar alguma curvatura na função de resposta.

Usualmente a curvatura na superfície de resposta é forte o suficiente para que o modelo linear (mesmo com o termo de interação incluído) seja inadequado. Como tal, um modelo de segunda ordem é necessário aplicar nestas situações. Este modelo é frequentemente utilizado na Metodologia da Superfície de Resposta pois tem um bom desempenho na resolução de problemas reais (nomeadamente, na análise e otimização de processos industriais como a moldação por injeção) e é um modelo bastante flexível, dada a sua adequabilidade como aproximação à verdadeira superfície de resposta. A utilização deste modelo quadrático dá-se numa região em que os fatores estejam próximos da sua zona ótima [34].

De uma forma matemática, o modelo de segunda ordem é representado por um polinómio que resulta da expansão da série de Taylor da função de resposta até aos termos de segunda ordem. Este resulta na expressão matemática da equação 3.3, à qual acrescem os termos quadráticos, responsáveis pela introdução da curvatura parabólica na função.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \sum_j \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (3.4)$$

O número de coeficientes,  $n\beta$ , presentes no polinómio é calculado pela equação 3.5 [37].

$$n\beta = \frac{(k + 1)(k + 2)}{2} \quad (3.5)$$

### 3.5.1 Planeamento de experiências para ajuste de modelos de segunda ordem

Existem diversos planeamentos de experiências que ajustam o modelo polinomial de segunda ordem, sendo o mais usado, o planeamento composto central (CCD). Este planeamento foi inicialmente proposto por Box e Wilson, em 1951 [38].

Este tipo de planeamento consiste num planeamento fatorial  $2^k$ , ao qual se adicionam  $2k$  experiências axiais e  $n_C$  experiências centrais. O número total de experiências a realizar é definido pela equação 3.6, com cada um dos três conjuntos de componentes experimentais explicados de seguida [34, 37]:

$$N = n_F + n_S + n_C \quad (3.6)$$

- $n_F = 2^k$  pontos experimentais de um planeamento fatorial completo, correspondentes aos vértices de um poliedro k-dimensional com coordenadas  $(x_1, x_2, \dots, x_k) = (\pm 1, \pm 1, \dots, \pm 1)$ . Estes pontos contribuem para a estimativa dos termos lineares e dos termos de interação entre fatores do modelo;
- $n_S = 2k$  pontos experimentais correspondentes aos vértices de uma estrela k-dimensional centrada no poliedro anterior, designados por pontos estrela, com coordenadas  $(\pm \alpha^*, 0, \dots, 0), (0, \pm \alpha^*, \dots, 0), \dots, (0, 0, \dots, \pm \alpha^*)$ . Estes pontos contribuem para a estimativa dos termos quadráticos do modelo e representam os novos extremos (alto e baixo) dos fatores considerados no Desenho de Experiências;
- $n_C \geq 1$  pontos centrais, com coordenadas  $(x_1, x_2, \dots, x_k) = (0, 0, \dots, 0)$ , que contribuem para a estimativa interna do erro (erro puro) do modelo e dos termos quadráticos do mesmo.

É fulcral que o modelo de segunda ordem providencie boas previsões ao longo da região experimental de interesse. Pretende-se dizer com isto que o modelo de segunda ordem deve ter uma variância da resposta prevista,  $V[\hat{y}(x)]$ , consistente e estável. A variância da resposta prevista num ponto  $x$  é dada por:

$$V[\hat{y}(x)] = \sigma^2 x' (X'X)^{-1} x \quad (3.7)$$

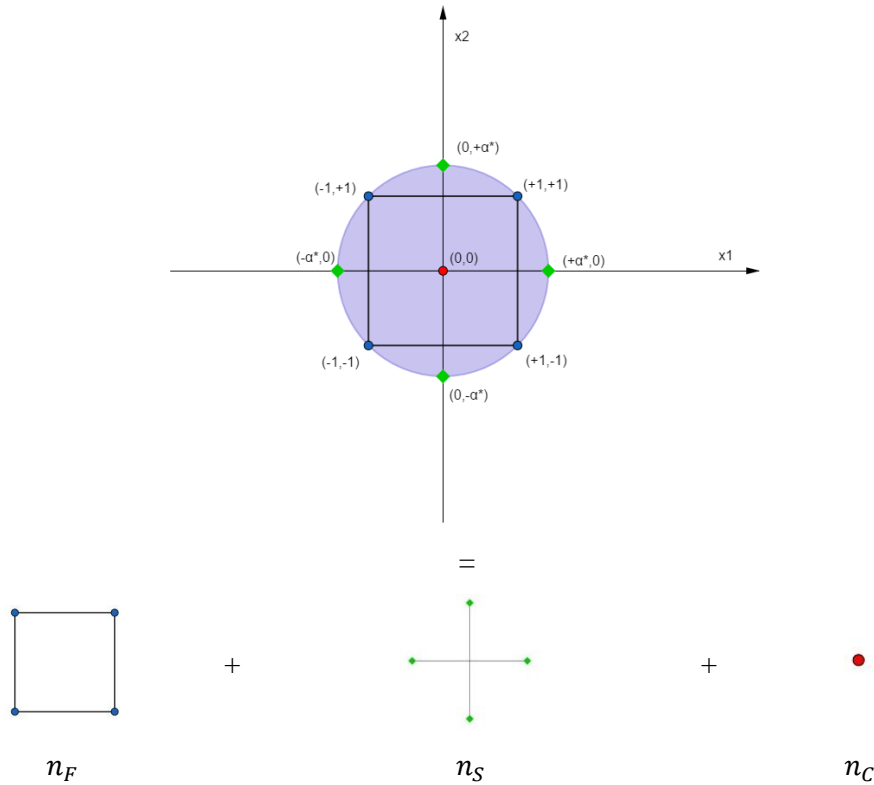
Em 1957, Box e Hunter [39] sugeriram que um planeamento de experiências ajustado a um modelo de segunda ordem deve ser rotativo. Diz-se que um planeamento de experiências é rotativo se a variância da resposta prevista é constante em todos os pontos  $x$  equidistantes do centro do planeamento, ou seja, que  $V[\hat{y}(x)]$  é constante em regiões esféricas. Os mesmos autores referiram ainda que existem dois parâmetros no planeamento que devem ser especificados: a distância  $\alpha^*$ , para induzir a rotatividade e o número de pontos centrais  $n_C$ , para tentar atingir uma precisão uniforme. O valor de  $\alpha^*$  depende do número de pontos relativos á componente fatorial do planeamento e é calculado pela equação 3.8 [31, 35].

$$\alpha^* = [n_F]^{-\frac{1}{4}} \quad (3.8)$$

A rotatividade tem um papel fulcral na escolha do tipo de planeamento composto central. Existem três tipos de planeamento composto central, que diferem entre si pela posição dos pontos axiais no domínio das variáveis: planeamento composto central circunscrito (CCC), planeamento composto central de face centrada (CCF) e planeamento composto central inscrito (CCI).

O planeamento composto central circunscrito é o tipo de planeamento mais comum para ajuste do modelo de segunda ordem, é o que explora um maior domínio das variáveis, e como tal é o utilizado neste trabalho. Neste tipo de planeamento, os pontos estrela estão a uma distância  $\alpha$  dos

pontos centrais e representam os novos extremos do domínio das variáveis. Estes planeamentos têm uma simetria circular, esférica ou hipersférica e apresentam 5 níveis para cada fator [40]. Na Figura 3.18 está ilustrado um planeamento composto central circunscrito considerando dois fatores (tal como no caso estudado nesta dissertação), no qual a área a azul representa o domínio das variáveis, os pontos azuis os extremos considerados no Desenho de Experiências inicial, os pontos verdes os novos extremos  $\alpha^*$  e o ponto vermelho as experiências centrais a realizar.



**Figura 3.18** – Planeamento composto central circunscrito para  $k=2$

Considerando o que foi acima referido, do Desenho de Experiências considerado inicialmente com 3 níveis para cada um dos dois fatores (pós-pressão e tempo de pós-pressão), ao recorrer ao planeamento composto central circunscrito para ajuste do modelo de segunda ordem, o Desenho de Experiências passa a ter em conta 5 níveis  $(-\alpha^*, -1, 0, +1, +\alpha^*)$  para cada fator. Sendo que é considerado um planeamento fatorial completo,  $|\alpha^*| = 1,414$ . Os níveis de cada fator, bem como a respetiva simbologia codificada são apresentados na Tabela 3.10. É de referir ainda que os valores dos novos extremos de cada fator foram selecionados a partir dos resultados obtidos dos estudos da preparação do molde de modo a garantir uma gama de funcionamento exequível.

**Tabela 3.10** – Valores a serem usados para os fatores de pressurização em cada um dos cinco níveis

Fatores de pressurização	Níveis				
	$-\alpha^*$	-1	0	+1	$+\alpha^*$
<b>Tempo (t)</b>	2,5	2,9	3,75	4,6	5
<b>Pressão (P)</b>	70	72,9	80	87,1	90

Acima, foi referido que o número total de experiências num planeamento composto central contabiliza pelo menos uma experiência central. Porém, na prática são utilizados entre 3 a 5 pontos centrais, de modo a garantir que o CCD é ortogonal. O requisito da ortogonalidade do planeamento é necessário para a avaliação de quais efeitos são significativos, podendo-se esperar uma boa estimativa do erro experimental. Como tal, tendo em conta a equação 3.6 e considerando a existência de 5 experiências centrais, conclui-se que o número total de experiências a realizar são 13. Estas 13 experiências serão replicadas 3 vezes, em cada cavidade, o que resulta num total de 78 peças obtidas (39 por cavidade). O planeamento de experiências para esta dissertação é apresentado na Tabela 3.11.

**Tabela 3.11** – Planeamento de experiências

Ensaio (peças)			Fatores			
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	t	t [s]	P	P [bar]
P 1.1	P 1.2	P 1.3	-1	2,9	-1	72,9
P 2.1	P 2.2	P 2.3	1	4,6	-1	72,9
P 3.1	P 3.2	P 3.3	-1	2,9	1	87,1
P 4.1	P 4.2	P 4.3	1	4,6	1	87,1
P 5.1	P 5.2	P 5.3	-1,414	2,5	0	80
P 6.1	P 6.2	P 6.3	1,414	5	0	80
P 7.1	P 7.2	P 7.3	0	3,75	-1,414	70
P 8.1	P 8.2	P 8.3	0	3,75	1,414	90
P 9.1	P 9.2	P 9.3	0	3,75	0	80
P 10.1	P 10.2	P 10.3	0	3,75	0	80
P 11.1	P 11.2	P 11.3	0	3,75	0	80
P 12.1	P 12.2	P 12.3	0	3,75	0	80
P 13.1	P 13.2	P 13.3	0	3,75	0	80

### 3.5.2 Análise de variância, teste de hipóteses e adequabilidade do modelo

A análise de variância (ANOVA) é uma técnica estatística utilizada para analisar o erro de medição e as fontes de variação do processo, possibilitando a repartição da variabilidade total dos dados experimentais por essas diferentes fontes. No Desenho de Experiências, a análise de variância de respostas que são variáveis contínuas pode ser feita para a média das observações e/ou para o índice Sinal-Ruído e considerando, ou não, a introdução de fatores de ruído. Assim, é possível analisar e determinar quais os fatores e/ou interação entre fatores que são estatisticamente significativos.

Os resultados da análise dos dados provenientes do conjunto de experiências efetuadas são apresentados na forma de uma tabela de análise de variância, apresentada na Tabela 3.12.

**Tabela 3.12** – Tabela de análise de variância para um modelo ajustado de regressão linear múltipla

Origem da Variação	Soma dos Quadrados ( $SS$ )	Graus de Liberdade ( $df$ )	Quadrados Médios ( $MS$ )	Estatística de teste F	Valor-p
Regressão (modelo ajustado)	$SS_R$	$k$	$MS_R$	$MS_R/MS_E$	
Residual (erro)	$SS_E$	$n - k - 1$	$MS_E$		
Total	$SS_T$	$n - 1$			

A variabilidade total dos valores da variável dependente  $y$ , é expressa através da soma dos quadrados dos desvios de  $y$  face ao seu valor médio  $\bar{y}$ , designada por soma dos quadrados total ( $SS_T$ ). A soma dos quadrados total consiste na soma de duas outras componentes: a soma dos quadrados da regressão ( $SS_R$ ), contabilizada pelo modelo ajustado, e da soma dos quadrados dos resíduos ( $SS_E$ ), não contabilizados para o modelo ajustado.

$$SS_R = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (3.11)$$

$$SS_E = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3.12)$$

$$SS_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (3.13)$$

$$SS_T = SS_R + SS_E \Leftrightarrow \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 + \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3.14)$$

Para averiguar a significância de um conjunto de parâmetros de um modelo de regressão linear múltipla são aplicados testes de hipóteses. A estatística de teste F é o teste de hipóteses mais utilizado e é expressa pela razão entre os quadrados médios da regressão ( $MS_R$ ) e os quadrados médios dos resíduos ( $MS_E$ ). Estes representam a fração da variância total em  $y$  explicada pelo modelo de regressão e pelos resíduos, respetivamente, e como pode ser observado nas equações 3.15 e 3.16 são representados pelo quociente entre a respetiva soma dos quadrados e os seus graus de liberdade [31, 41].

$$MS_R = \frac{SS_R}{k} \quad (3.15)$$

$$MS_E = \frac{SS_E}{n - k - 1} \quad (3.16)$$

$$F = \frac{MS_R}{MS_E} = \frac{\frac{SS_R}{k}}{\frac{SS_E}{n - k - 1}} \quad (3.17)$$

Num teste de significância da regressão, a hipótese nula ( $H_0$ ) é confrontada com a hipótese alternativa ( $H_1$ ). Estas hipóteses consistem no seguinte:

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0 \text{ (excluindo } \beta_0 \text{)}$$

$$H_1: \beta_j \neq 0 \text{ para pelo menos um } j \text{ (excluindo } \beta_0 \text{)}$$

Se a hipótese nula for verdadeira, a estatística de teste F assume um valor próximo de 1 e o modelo segue uma distribuição F com  $k$  graus de liberdade no numerador e  $n - k - 1$  graus de liberdade no denominador. Por sua vez, se se verificar que F excede o valor tabelado para  $F_{k,n-k-1,\alpha}$  então a hipótese nula é rejeitada, o que implica que pelo menos uma variável é estatisticamente significativa (não zero) para o modelo e os quadrados médios da regressão devem ter um valor maior que os quadrados médios dos resíduos [33, 37].

O nível de significância,  $\alpha$ , para um dado teste de hipóteses é um valor para o qual um valor-p menor ou igual a  $\alpha$  é considerado estatisticamente significativo. Os valores típicos do nível de significância são 0.1, 0.05 e 0.01. Estes valores correspondem á probabilidade de observar um valor extremo por acaso. Por exemplo, para um nível de confiança de 0,05 é considerado um intervalo de confiança  $(1 - \alpha)$  de 95% [37].

Um outro parâmetro que é quantificado numa análise estatística do modelo e que é um indicador do ajuste do modelo de regressão é o coeficiente de determinação,  $R^2$ . O coeficiente de determinação é uma medida da redução da variabilidade da resposta  $y$  obtida ao usar as variáveis  $x_1, x_2, \dots, x_k$  no modelo. Este coeficiente de adequabilidade do modelo é calculado tendo em conta a equação 3.18.

$$R^2 = \frac{SS_R}{SS_T} = 1 - \frac{SS_E}{SS_T} \quad (3.18)$$

O coeficiente de determinação varia entre 0 e 1, indicando, em percentagem, o quanto o modelo consegue representar a resposta do processo. Quando  $R^2 = 1$  a resposta prevista coincide na perfeição com a resposta observada. Ao serem adicionados parâmetros ao modelo, o coeficiente de determinação aumenta. Como tal, é adotado um coeficiente de determinação ajustado,  $\bar{R}^2$ , calculado pela expressão apresentada na equação 3.19. Se  $R^2$  e  $\bar{R}^2$  forem drasticamente diferentes então existe a possibilidade de terem sido incluídos termos não significativos no modelo [31].

$$\bar{R}^2 = 1 - \frac{\frac{SS_E}{n-k-1}}{\frac{SS_T}{n-1}} = 1 - (1 - R^2) \frac{n-1}{n-k-1} \quad (3.19)$$

Apesar de um modelo de regressão poder ter um valor de  $R^2$  elevado e ser significativo, este pode apresentar falta de ajuste. A falta de ajuste pode ocorrer se não forem incluídos no modelo termos importantes como interações e termos quadráticos, ou se não forem incluídos termos de ordem superior que afetam a resposta.

### 3.5.3 Razão Sinal-Ruído (*S/N Ratio*)

Com o intuito de determinar condições e propriedades ótimas de produção, em 1986, Genichi Taguchi [42] criou uma nova filosofia conhecida por Projeto Robusto de Parâmetros (RPD), que tem em conta todos os fatores que operam num sistema: os fatores controláveis e os fatores de ruído. Com base nesta, a transformação dos dados obtidos de um planeamento de experiências realizado com repetições é feita pela Razão Sinal-Ruído (S/N), que é uma medida da variabilidade do processo. As expressões que permitem a transformação dos dados numa Razão Sinal-Ruído foram definidas de acordo com o tipo de característica da qualidade que se pretende estudar, sendo as mais conhecidas as seguintes: “Maior-é-melhor”, “Nominal-é-melhor” e “Menor-é-melhor” [32, 43].



- **Maior-é-melhor (Tipo L)**

Para as características da qualidade do tipo “Maior-é-melhor”, os valores das respostas são do tipo contínuo e não negativos, e vão de zero até infinito. O valor que se pretende atingir é infinito ou o maior possível. A equação 3.20 é utilizada no cálculo da Razão Sinal-Ruído para uma característica da qualidade do tipo L [44]:

$$(S/N)_i = -10 \times \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{y_{ij}^2} \right] \quad (3.20)$$

onde  $(S/N)_i$  é a Razão Sinal-Ruído da experiência  $i = 1, 2, \dots, N$ , em decibéis (dB);  $y_{ij}$  é a  $j$ -ésima observação da experiência  $i$  e  $n$  é o número de observações em cada experiência.

- **Nominal-é-melhor (Tipo N)**

Para as características estáticas do tipo “Nominal-é-melhor” os valores das respostas são do tipo contínuo e não negativos, e vão de zero até infinito. Este tipo de problema tem um valor objetivo diferente de zero e a variância é zero quando a média é zero. A equação 3.21 é utilizada para determinar a Razão Sinal-Ruído deste tipo de característica da qualidade [32, 44]:

$$(S/N)_i = 10 \times \log \left[ \frac{\bar{Y}_i^2}{S_i^2} - \frac{1}{n} \right] \quad (3.21)$$

onde  $(S/N)_i$  é a Razão Sinal-Ruído da experiência  $i = 1, 2, \dots, N$ , em decibéis (dB);  $\bar{Y}_i^2$  e  $S_i^2$  são a média amostral e a variância amostral da  $i$ -ésima experiência e  $n$  é o número de observações em cada experiência.

Se o número de observações for relativamente elevado e igual em todas as experiências, então a equação seguinte pode ser utilizada no cálculo da Razão Sinal-Ruído para uma característica do tipo N:

$$(S/N)_i = 20 \times \log \left[ \frac{\bar{Y}_i}{S_i} \right] \quad (3.22)$$

- **Menor-é-melhor (Tipo S)**

Um problema do tipo “Menor-é-melhor” tem as seguintes características: a característica da qualidade é contínua e não negativa; o valor objetivo é zero; o objetivo é minimizar a média e a variância em simultâneo. Este tipo de característica é o oposto do tipo “Maior-é-melhor”.

A equação seguinte é utilizada no cálculo da Razão Sinal-Ruído para uma característica do tipo “Menor-é-melhor” [44]:

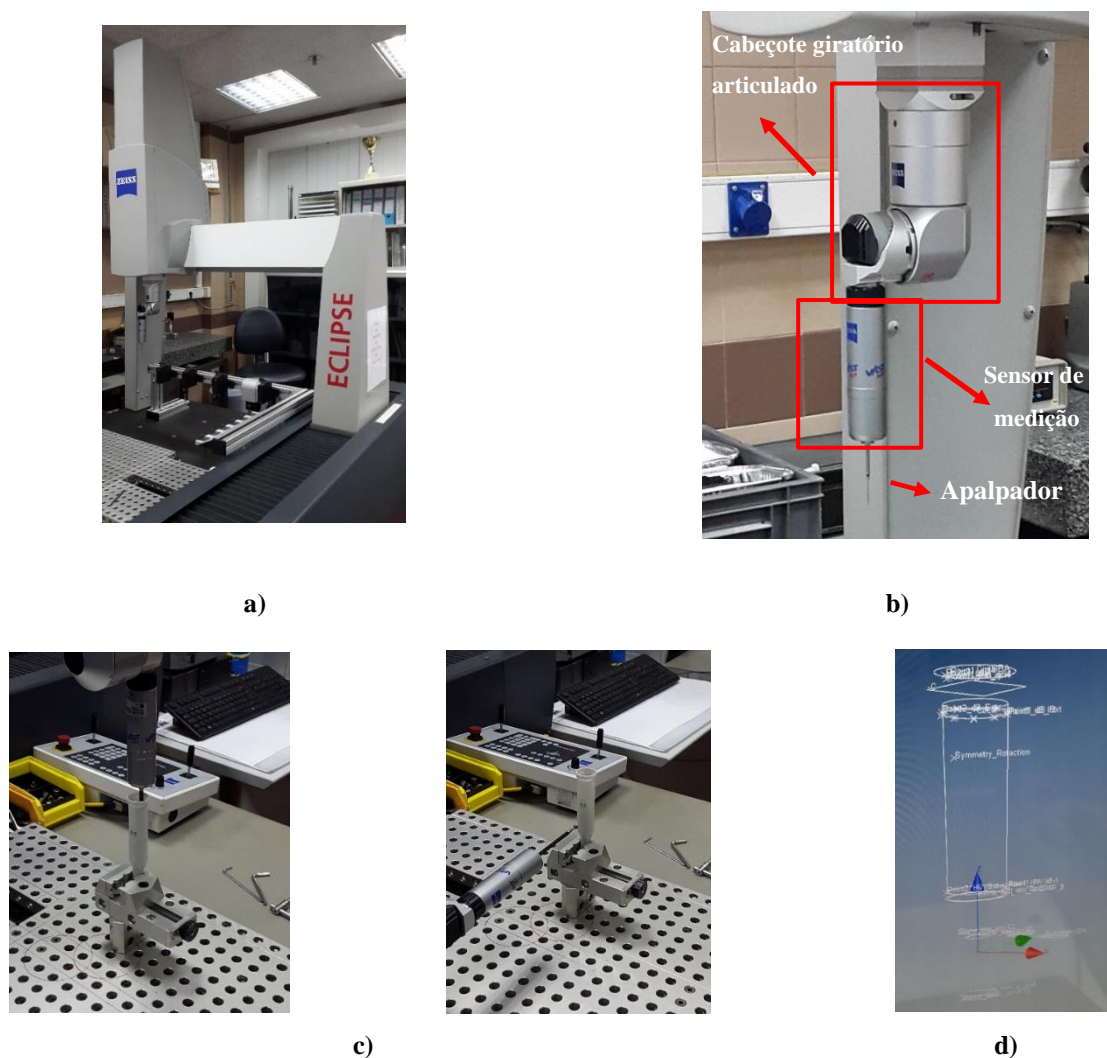
$$(S/N)_i = -10 \times \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 \right] \quad (3.23)$$

### 3.6 Máquina de medição por coordenadas

De modo a poder avaliar a contração volumétrica a que as 78 peças obtidas do estudo do Desenho de Experiências foram sujeitas, foram efetuadas medições de todas as principais dimensões das cases e posteriormente comparadas com os respetivos valores teóricos estabelecidos no desenho técnico da peça (Anexo H). Observando o desenho técnico da peça, conclui-se que esta peça apresenta 8 características principais a serem analisadas: uma delas é uma característica chave do produto (KPC) e sete delas são consideradas características de interface qualidade/cliente (QCI). Assim, as características são as seguintes: diâmetro interior na zona de posicionamento dos terminais (KPC 1), espessura de parede na secção de corte C (QCI 3), comprimento da case (QCI 4), diâmetro exterior na secção de corte C (QCI 6), energia mínima que a peça deve suportar (QCI 9), massa mínima da peça (QCI 10), diâmetro exterior da base da peça (QCI 11) e comprimento da torre (QCI 12). Com exceção do QCI 9 e do QCI 10, todas as dimensões foram medidas utilizando uma máquina de medição por coordenadas. Uma máquina de medição por coordenadas (vulgarmente referida como *CMM*) é um equipamento utilizado no âmbito da metrologia para efetuar medições tridimensionais das características geométricas de um objeto. Este equipamento apresenta 6 graus de liberdade e efetua as medições recorrendo a um sistema que utiliza um apalpador acoplado a um sensor de medição inserido num cabeçote giratório, apresentando os resultados na forma matemática. Este sistema pode ser controlado manualmente por um operador ou por computador.

Todas as medições foram efetuadas utilizando uma máquina de medição por coordenadas de ponte Zeiss Eclipse 700, presente no Laboratório de Metrologia da Delphi Seixal. Durante a realização das medições esta máquina esteve também equipada com um cabeçote giratório articulado Zeiss RDS-CAA, um sensor de medição Zeiss VAST XXT TL1 e três apalpadores diferentes (para diferentes medições no interior e no exterior da peça). Esta *CMM* utiliza um sistema de coordenadas cartesianas, possui uma resolução de 0,5 µm e uma incerteza ( $E_0$ ) dada pela expressão  $E_0 = 2,5 + \frac{L}{250}$  (µm), sendo L a distância medida em mm. O controlo da operação de medição foi efetuado por computador, utilizando o *software* Zeiss Calypso version 4.6.4, o qual permite observar o mapeamento da peça em tempo real (Figura 3.19).

De todas as características referidas anteriormente, a energia mínima que a peça deve suportar (QCI 9) e a massa mínima da peça (QCI 10) não foram quantificadas com recurso à *CMM*. A primeira foi obtida através da realização do teste de resistência mecânica, abordado no tópico seguinte, e a segunda foi quantificada recorrendo a uma balança analítica A&D GR-200 (Figura 3.20). De todas as 78 peças analisadas, apenas 3 delas ficaram abaixo do valor mínimo admissível (13,5 g). Segundo as informações obtidas após a observação do desenho técnico da peça, a espessura de parede na secção de corte C (QCI 3) deve ser medida 4 vezes em posições igualmente espaçadas a 45°. Como tal, foram obtidas as espessuras referentes a cada uma dessas posições (QCI 3\_1, QCI 3\_2, QCI 3\_3, QCI 3\_4) e efetuada uma média destas para obtenção dos valores do QCI 3. Estas e as restantes dimensões, à exceção do QCI 9, estão apresentadas no Anexo I.



**Figura 3.19** – Medição das coordenadas das peças do DOE: **a)** *CMM* Zeiss Eclipse 700; **b)** Equipamentos de medição; **c)** Medição das dimensões no interior e no exterior da peça; **d)** *Software* Zeiss Calypso 4.6.4



**Figura 3.20** – Balança analítica utilizada

### 3.7 Teste de resistência mecânica (*Ball Test*)

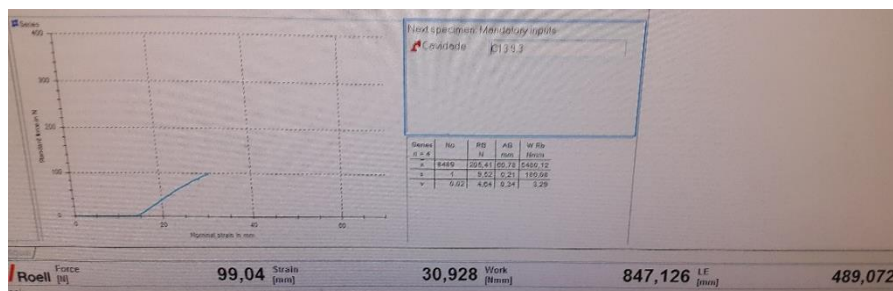
Para além da análise das medidas que permitem avaliar a contração volumétrica sofrida pelas peças e da massa das mesmas, pretende-se também avaliar, com base neste teste, a força na rotura ( $F_b$ ), o deslocamento na rotura ( $S_b$ ), a força máxima ( $F_{max}$ ) e o trabalho ( $W$ ) a que as peças são sujeitas com a alteração dos parâmetros de pressurização. Estas respostas são registadas a partir de um gráfico Força-Deslocamento obtido através da realização de um teste de resistência mecânica denominado de *Ball Test*, a todas as 78 peças anteriormente medidas. O *Ball Test* é um ensaio destrutivo, no qual um punção (com uma determinada geometria específica para cada peça testada) penetra a peça de estudo e exerce força nesta até ocorrer a sua rotura. Para tal é utilizada uma máquina de testes universal, capaz de realizar ensaios de tração, compressão e flexão, equipada com uma célula de carga. Este teste é apenas realizado na Delphi Seixal e é o único teste de resistência mecânica utilizado na empresa para testar os seus componentes poliméricos. No entanto, a empresa não possui qualquer documentação interna relativa ao seu procedimento experimental. A explicação seguinte tem em conta o procedimento experimental realizado, observado e transmitido pelos engenheiros e operadores.

No *Ball Test*, em primeiro lugar, a peça a ser testada é constrangida em termos de movimentos através de um suporte de fixação que envolve a zona da torre. De seguida, a peça é colocada numa posição vertical com a secção de maior diâmetro virada para cima e dá-se início ao teste, no qual um punção com uma extremidade esférica de diâmetro 21,6 mm (Anexo J), produzido em aço AISI H13 com revestimento BALINIT® A, previamente roscado num suporte ligado à célula de carga Zwick Roell KAF-Z inicia um movimento descendente rápido de cerca de 40 mm (distância que permite a entrada da extremidade esférica no interior da peça sem tocar nesta e que é diferente consoante a geometria da peça que se irá testar). Depois de finalizado esse movimento, ocorre uma

pequena pausa, após a qual se dá início a um movimento descendente lento de cerca de 46 mm, até ocorrer a rotura da peça. O teste finaliza com um movimento ascendente rápido para recuo do punção até à sua posição inicial e remoção da peça do suporte de fixação. É de referir que só é possível testar a tenacidade da peça pois esta apresenta uma ligeira inclinação (mais concretamente, um ângulo de  $0,25^\circ$ ) ao longo do seu comprimento, projetada propositadamente para facilitar a extração do molde de injeção, como se pode verificar no desenho técnico da peça (Anexo H). O controlo de toda a operação foi efetuado por computador, utilizando o *software* Zwick Roell *testXpert® V12.3 Master*, o qual gera, em tempo real, um gráfico da força exercida pelo punção em função do deslocamento do mesmo (a partir do momento em que se inicia o movimento descendente lento) e apresenta os valores de força na rotura ( $F_b$ ), deslocamento na rotura ( $S_b$ ), força máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ ) e trabalho exercido pelo punção ( $W$ ). No final de cada teste é gerado um ficheiro de dados que é exportado para uma diretoria previamente definida e ainda uma imagem do gráfico anteriormente referido. Na Figura 3.21 encontra-se ilustrado o teste acima descrito.

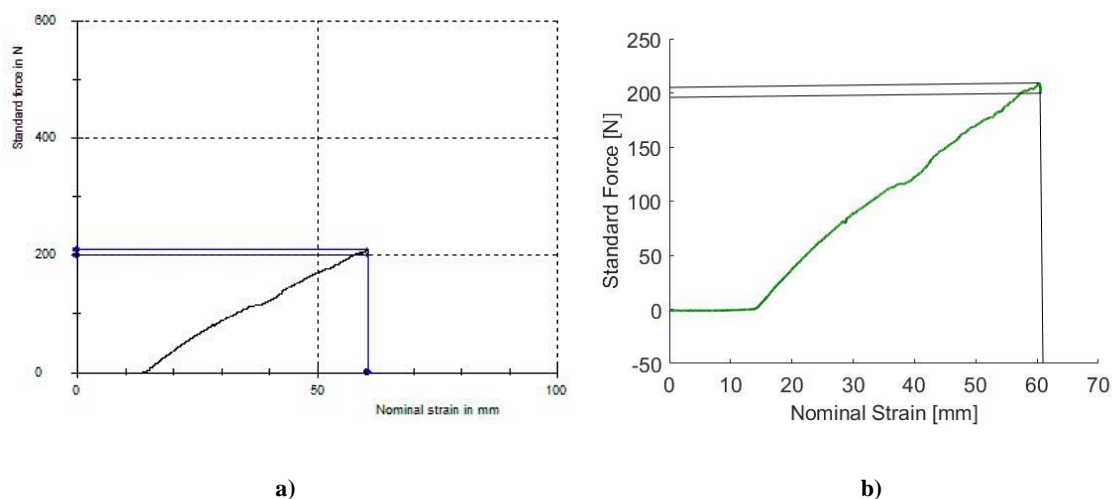


Nr	Date	Lock time	Clock	Ad	RS	N	W	Min	Max	Nr
max										
min								7000.00		
8498	26.10.2015	1:57.24	C15	1383	81114	129	445791	277	444	203.0
8500	27.10.2015	1:25.18	C15	12	81212	51	445613	789	1452	252.0
8517	19.10.2015	12:11.54	C12	1	81101	1	445613	144	144	252.0
8522	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8523	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8524	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8525	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8526	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8527	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8528	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8529	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8530	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8531	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8532	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8533	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8534	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8535	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8536	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8537	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8538	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8539	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8540	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8541	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8542	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8543	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8544	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8545	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8546	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8547	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8548	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8549	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8550	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8551	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8552	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8553	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8554	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8555	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8556	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8557	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8558	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8559	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8560	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8561	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8562	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8563	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8564	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8565	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8566	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8567	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8568	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8569	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8570	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8571	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8572	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8573	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8574	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8575	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8576	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8577	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8578	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8579	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8580	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8581	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8582	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8583	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8584	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8585	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8586	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8587	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8588	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8589	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8590	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8591	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8592	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8593	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8594	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8595	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8596	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8597	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8598	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8599	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8600	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8601	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8602	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8603	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8604	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8605	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8606	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8607	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8608	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8609	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8610	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8611	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8612	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8613	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8614	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8615	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8616	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8617	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8618	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8619	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8620	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8621	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8622	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8623	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8624	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8625	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8626	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8627	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0
8628	13.10.2015	1:17.17	C15	1383	81220	565	445613	277	444	252.0



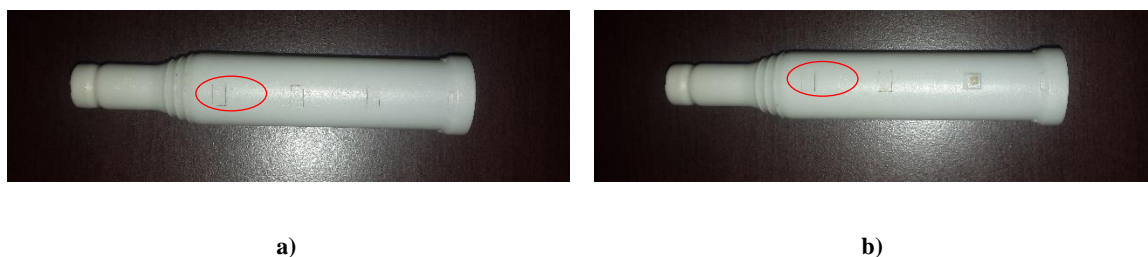
**Figura 3.21** – Teste de resistência mecânica (*Ball Test*)

Dado que o gráfico obtido diretamente do *software* da máquina de testes universal Zwick Roell BZ2.5/TN1S é de difícil visualização, foram criados dois programas no *software MATLAB* que conjuntamente permitem gerar, para cada peça, um gráfico Força-Deslocamento com uma qualidade consideravelmente superior, a partir dos dados de cada um dos ficheiros extraídos após a realização dos testes (Anexo K). Na Figura 3.22 são comparados os dois gráficos referidos anteriormente, referentes ao estudo de uma mesma peça.



**Figura 3.22** – Gráfico Força vs Deslocamento relativo à 2ª réplica da 12ª experiência, obtida da cavidade 13: **a)** gerado pelo *software* Zwick Roell *testXpert® V12.3 Master*; **b)** gerado pelo programa criado em *MATLAB*

Depois de todas as 78 peças terem sido sujeitas ao teste de resistência mecânica, foi inspecionado o local da rotura de cada uma delas. Concluiu-se então que das 39 peças recolhidas da cavidade 12, apenas 3 delas tiveram a sua rotura localizada na linha de solda, enquanto que as restantes sofreram a rotura na zona dos 3 castelos. No que diz respeito às peças da cavidade 13, todas elas apresentaram a sua rotura localizada na zona dos 2 castelos, onde também está identificado o número da cavidade. É de referir que a rotura de todas as peças ocorre, tipicamente, na mesma altura da peça (na parte superior do primeiro castelo mais próximo da zona da torre) e que nas 2 cavidades as peças partem do mesmo lado do molde. Na Figura 3.23 pode-se observar as zonas de rotura acima referidas.



**Figura 3.23** – Identificação da localização da rotura nas peças: **a)** da cavidade 12; **b)** da cavidade 13

No Capítulo 3.6 foi referido que a energia mínima suportada pelas peças (QCI 9) seria medida neste teste. Essa mesma resposta trata-se do trabalho suportado pela peça até à rotura (W). No desenho técnico da peça é referido que o valor mínimo de energia admissível para esta peça é de 350 kgf.mm ( $\approx 3433,5$  N.mm) e que o valor mínimo médio é de 400 kgf.mm ( $\approx 3924$  N.mm). Depois de analisados todos os 78 ensaios realizados, verificou-se que o valor mais baixo obtido foi 4434 N.mm e 4792,89 N.mm para as peças obtidas da cavidade 12 e cavidade 13, respetivamente.





## **Apresentação e Discussão de Resultados**

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos na componente experimental desta dissertação. Em primeiro lugar são apresentados os principais resultados da preparação do molde N55 Case#6 PLT 461, os quais servem de base para a aplicação do planeamento de experiências utilizado neste trabalho. Para análise dos resultados do planeamento de experiências realizou-se, em primeiro lugar, a análise das respostas médias à Razão Sinal-Ruído e ao declive da reta para verificar qual o efeito dos fatores de pressurização sobre as respostas estudadas e posteriormente identificar os melhores níveis para esses mesmos fatores. De seguida, tendo por base a Metodologia da Superfície de Resposta, verificou-se quais os fatores de pressurização que influenciam as respostas de estudo e como estes as influenciam. Com base nesta metodologia obtiveram-se também os modelos empíricos que descrevem o comportamento das diferentes respostas.

### **4.1 Resultados da preparação do molde**

No Capítulo 3.4 foi apresentada a metodologia utilizada para a preparação do molde de estudo, bem como o seu procedimento experimental. Como tal, são agora apresentados na Tabela 4.1 os principais resultados relativos à aplicação desta metodologia com base no estudo dos 6 passos. Os valores referentes aos parâmetros de processo obtidos como principais resultados de algum dos 6 estudos considerados são introduzidos na máquina injetora e controlados segundo uma gama em torno desses valores. Para auxiliar o funcionário responsável pelo preenchimento dos *inputs* e *outputs* referentes a um novo molde que seja sujeito a validação, foi criada uma folha que contém informações, regras e notas de fabricantes relativas a parâmetros das máquinas antigas (CC100) e das máquinas recentes (CC200). Este documento pode ser consultado no Anexo L.

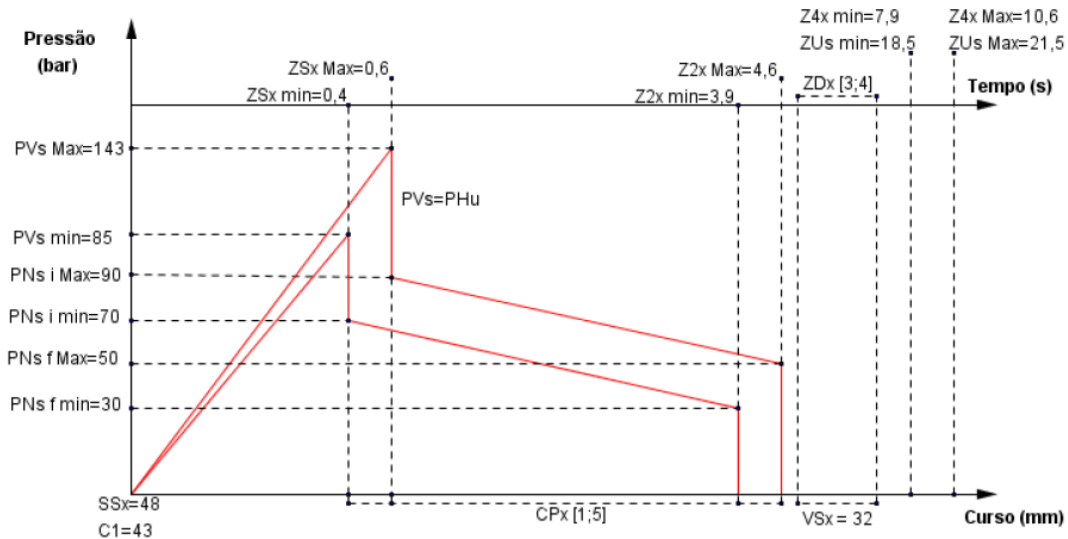
Na página traseira da nova folha de *setup* para além dos resultados dos estudos incluídos na preparação do molde existe ainda um gráfico de injeção que pretende resumir todo o processo de moldação por injeção para o molde associado. O gráfico de injeção referente ao molde N55 Case#6 PLT 461 encontra-se representado na Figura 4.1. Neste gráfico é representado, de forma ideal, o comportamento da pressão na cavidade em função do tempo e do curso do fuso. No entanto, como

pode ser observado na Figura 4.1 são representadas duas curvas que correspondem ao comportamento mínimo e máximo do processo. Enquanto a máquina injetora estiver a funcionar e o molde estiver a produzir peças, o processo de injeção deve ser tal que permita que a sua curva de injeção em tempo real esteja compreendida entre as duas curvas “teóricas”.

Este gráfico tem início com a fase de enchimento que é representada por uma reta com declive positivo até atingir o pico de pressão de injeção (PVs). Sendo que está retratada a situação ideal, então nesta considera-se que a comutação para a fase de pós-pressão é feita instantaneamente no pico de pressão de injeção, ou seja, onde  $PVs = PHu$ . Na situação real ocorre sempre um atraso na comutação. A fase de injeção dá-se entre C1 (curso do fuso) e C3 (curso de comutação), durante um tempo ZSx. No final da comutação a pressão baixa de PVs/PHu para um valor inicial de pós-pressão (PNs i) e inicia-se o perfil de pressão em rampa até um valor final de pós-pressão, PNs f. Esta fase decorre durante um tempo Z2x, em que no qual o fuso tem um deslocamento correspondente à almofada (CPx). Uma vez terminada esta fase, a pressão torna-se nula e dá-se início ao arrefecimento das peças moldadas, que decorre durante um tempo Z4x, estando no gráfico coincidente com o tempo total de ciclo, ZUs. Ao mesmo tempo ocorre a dosagem de material para o próximo ciclo de moldação durante um tempo ZDx e que na qual se deve garantir que o volume de dosagem (VSx) comporta o material necessário para as fases de enchimento e de pressurização. Este volume de dosagem corresponde em termos matemáticos à diferença entre o curso do fuso e o curso de comutação, como já havia sido referido no Capítulo 3.4.1. Após a dosagem ocorre uma descompressão (C4/C2) de 5 mm, o que faz com que o curso total de dosagem (SSx) se encontre na posição 48 mm.

**Tabela 4.1** – Resultados obtidos do estudo dos 6 passos

Estudo	Principais resultados
<b>Estudo reológico – Teste de viscosidade</b>	Velocidade de injeção = 75 mm/s Curso do fuso (C1) = 11 mm Curso de comutação (C3) = 43 mm Volume de dosagem (VS) = C1 – C3 = 32 mm
<b>Estudo do balanceamento de cavidades</b>	Diferença máxima de massa entre cavidades < 2%
<b>Estudo da queda de pressão</b>	Pico de pressão hidráulica = 119,2 bar Maior queda de pressão entre os 15 e os 75% de enchimento das peças (39,70% = 32,6 bar)
<b>Estudo da janela de processo</b>	Pós-pressão = 80 bar numa gama [70;90] bar Temperatura do molde = 140 °C
<b>Estudo da solidificação do ponto de injeção</b>	Tempo mínimo de pós-pressão = 4 s
<b>Estudo do tempo de arrefecimento</b>	Tempo de arrefecimento = 8 s



**Figura 4.1** – Gráfico de injeção referente ao molde N55 Case#6 PLT 461

A folha de *setup* correspondente ao molde N55 Case#6 PLT 461, devidamente preenchida, encontra-se no Anexo M.

## 4.2 Resultados da análise da Razão Sinal-Ruído

De modo a analisar os efeitos dos fatores de pressurização (tempo e pressão) sobre cada resposta e consequentemente identificar os melhores níveis desses fatores, procedeu-se à análise das respostas médias à Razão Sinal-Ruído e ao declive da reta recorrendo ao *software* de análise de dados, *Minitab*. As respostas avaliadas foram as características mecânicas que resultam como *output* do *Ball Test* e as características dimensionais obtidas após mapeamento por parte da *CMM* para avaliação da contração volumétrica das peças. No que diz respeito às características mecânicas, foram avaliadas as seguintes respostas:

- Força na rotura ( $F_b$ );
- Deslocamento na rotura ( $S_b$ );
- Força máxima exercida sobre a peça ( $F_{max}$ );
- Trabalho ( $W$ ).

Sendo que cada uma destas respostas (que se apresentam como características da qualidade) são do tipo “Maior-é-melhor”, foi considerada a equação 3.20 para efetuar a transformação dos dados provenientes do Desenho de Experiências numa Razão Sinal-Ruído.

No que diz respeito à avaliação da contração volumétrica por parte das peças após serem injetadas, foram avaliadas as seguintes respostas:

- Diâmetro interior na zona de posicionamento dos terminais (KPC 1);
- Espessura de parede na secção de corte C (QCI 3);
- Comprimento da case (QCI 4);
- Diâmetro exterior na secção de corte C (QCI 6);
- Diâmetro exterior na base da case (QCI 11);
- Comprimento da torre (QCI 12);
- Massa mínima das peças (QCI 10).

Estas características são do tipo “Nominal-é-melhor” e como tal foi utilizada a equação 3.22 para transformação dos dados.

A Razão Sinal-Ruído (Razão S/N) é utilizada para identificar as configurações do fator de controle que minimizam a variabilidade provocada pelos fatores de ruído. “Delta” é a diferença entre os valores de resposta médios mais altos e mais baixos para cada fator. A linha “Posição” indica o efeito relativo de cada fator na resposta.

Considere-se o fator  $F_b$ . A Tabela 4.2 e a Tabela 4.3 permitem identificar os melhores níveis dos fatores para a Razão Sinal-Ruído, seleccionando os níveis com a maior Razão Sinal-Ruído. A linha “Posição” permite identificar os fatores mais significativos.

**Tabela 4.2** - Tabela de Resposta para Razões Sinal-Ruído -  $F_b$  (Cavidade 12)

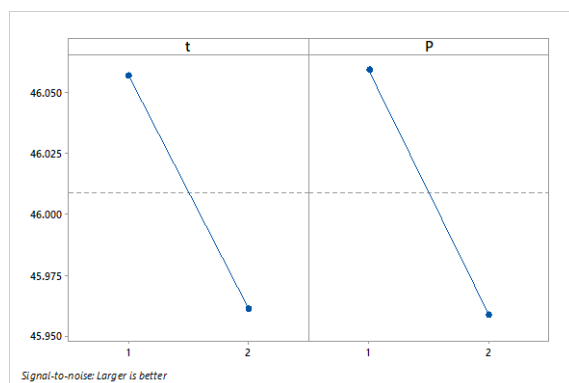
Nível	t	P
1	46.06	46.06
2	45.96	45.96
<b>Delta</b>	0.10	0.10
<b>Posição</b>	2	1

**Tabela 4.3** - Tabela de Resposta para Razões Sinal-Ruído -  $F_b$  (Cavidade 13)

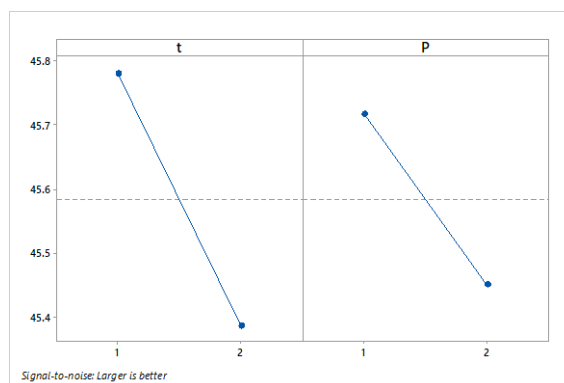
Nível	t	P
1	45.78	45.72
2	45.39	45.45
<b>Delta</b>	0.39	0.27
<b>Posição</b>	1	2

Na cavidade 12, a pressão (P) (Delta 0.1, Posição 1) exerce o maior efeito sobre a Razão S/N, seguida pelo tempo (Delta 0.1, Posição 2). Na cavidade 13 o tempo (t) exerce o maior efeito sobre a Razão S/N (Delta 0.39, Posição 1), seguida pela pressão (Delta 0.27, Posição 2).

Simultaneamente construíram-se os gráficos a partir dos valores da Tabela 4.2 e da Tabela 4.3, onde é possível identificar rapidamente os melhores níveis dos fatores (Figura 4.2 e Figura 4.3).



**Figura 4.2** - Fatores de Controlo S/N –  $F_b$   
(Cavidade 12)



**Figura 4.3** - Fatores de Controlo S/N –  $F_b$   
(Cavidade 13)

Assim, para a Cavidade 12, analisando a Tabela 4.2 e o gráfico na Figura 4.2, verifica-se que na análise das respostas médias à Razão Sinal-Ruído, o fator mais significativo é a pressão (P) relativamente aos efeitos do fator tempo (t), e os melhores níveis dos fatores são:  $t_1P_1$ . Para a Cavidade 13 (Tabela 4.3 e Figura 4.3) os melhores níveis dos fatores são também  $t_1P_1$ .

Os restantes fatores foram analisados de forma análoga, pelo que serão apresentados apenas os resultados obtidos. Assim, construiu-se a Tabela 4.4, onde se apresentam os melhores níveis dos fatores dando-se ênfase aos níveis mais significativos relativamente ao efeito dos outros fatores (a vermelho para a cavidade 12 e a verde para a cavidade 13).

**Tabela 4.4** – Melhores níveis dos fatores – Análise das Respostas Médias S/N

	Cavidade 12		Cavidade 13	
	Tempo	Pressão	Tempo	Pressão
Força na rotura ( $F_b$ )	1	1	1	1
Deslocamento na rotura ( $S_b$ )	1	2	2	2
Força máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ )	1	1	1	1
Trabalho ( $W$ )	1	1	1	1
Diâmetro interior na zona de posicionamento dos terminais (KPC 1)	2	2	2	2
Espessura de parede na secção de corte C (QCI 3)	2	1	2	2
Comprimento da case (QCI 4)	2	2	2	1
Diâmetro exterior na secção de corte C (QCI 6)	2	2	2	2
Diâmetro exterior da base da case (QCI 11)	2	1	2	1
Comprimento da torre (QCI 12)	2	1	2	2
Massa mínima das peças (QCI 10)	2	2	2	2

Em seguida analisaram-se as respostas médias. À semelhança do que foi feito para a Razão Sinal-Ruído, construiu-se a tabela das respostas médias e o respetivo gráfico, onde é possível identificar os melhores níveis dos fatores, e o fator mais significativo, quando comparando os efeitos de todos os fatores. Considere-se novamente a resposta  $F_b$ .

**Tabela 4.5** – Tabela de Resposta para médias -  $F_b$   
(Cavidade 12)

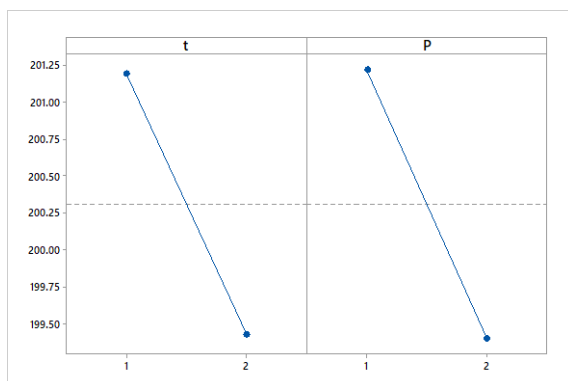
Nível	t	P
1	201.2	201.2
2	199.4	199.4
<b>Delta</b>	1.8	1.8
<b>Posição</b>	2	1

**Tabela 4.6** - Tabela de Resposta para médias –  $F_b$   
(Cavidade 13)

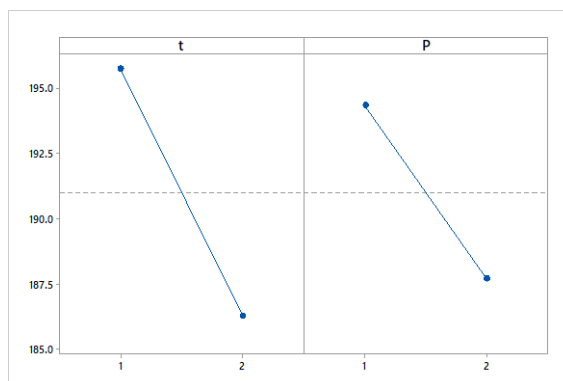
Nível	t	P
1	195.7	194.3
2	186.3	187.7
<b>Delta</b>	9.4	6.6
<b>Posição</b>	1	2

Para a Cavidade 13, o tempo (t) (Delta 9,4, Posição 1) também exerce o maior efeito sobre as médias, seguida pela pressão (Delta 6,6, Posição 2).

Nas Figura 4.4 e Figura 4.5 encontram-se os gráficos construídos a partir dos valores da Tabela 4.5 e da Tabela 4.6, respetivamente.



**Figura 4.4** - Fatores de Controle para médias –  $F_b$   
(Cavidade 12)



**Figura 4.5** - Fatores de Controle para médias –  $F_b$   
(Cavidade 13)

Verifica-se que em termos da sensibilidade do sistema, o fator mais significativo é a pressão (P) no caso da cavidade 12 e o tempo (t) no caso da Cavidade 13. Os melhores níveis dos fatores são, em ambos,  $t_1P_1$ .

A Tabela 4.7 apresenta os factores significativos e os melhores níveis de todos os fatores, de forma a melhorar a sensibilidade do sistema.

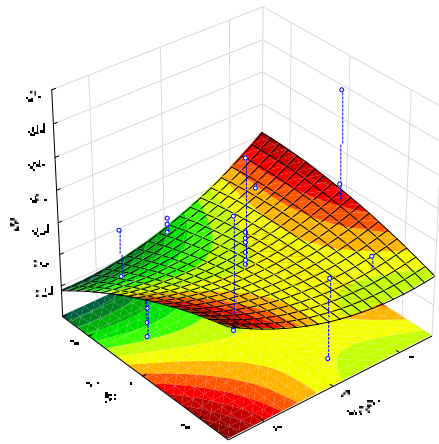
**Tabela 4.7** – Melhores níveis dos fatores – Análise das Respostas Médias

	Cavidade 12		Cavidade 13	
	Tempo	Pressão	Tempo	Pressão
Força na rotura ( $F_b$ )	1	1	1	1
Deslocamento na rotura ( $S_b$ )	1	2	2	2
Força máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ )	1	1	1	1
Trabalho ( $W$ )	1	1	1	1
Diâmetro interior na zona de posicionamento dos terminais (KPC 1)	1	1	1	1
Espessura de parede na secção de corte C (QCI 3)	1	2	1	2
Comprimento da <i>case</i> (QCI 4)	1	2	1	2
Diâmetro exterior na secção de corte C (QCI 6)	2	2	1	2
Diâmetro exterior da base da <i>case</i> (QCI 11)	1	2	1	1
Comprimento da torre (QCI 12)	1	2	1	1
Massa mínima das peças (QCI 10)	2	2	2	2

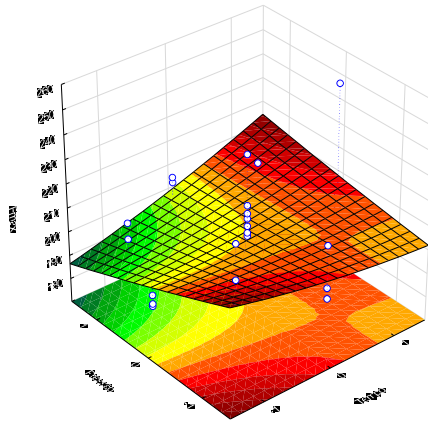
### 4.3 Resultados da Metodologia de Superfície de Resposta

De modo a analisar a influência dos parâmetros de pressurização (tempo e pressão) nas respostas de estudo, utilizou-se a Metodologia de Superfície de Resposta que recorre a um planeamento composto central circunscrito, definido no Capítulo 3.5.1. A adequação dos modelos de resposta foi testada usando a estatística de teste F com um intervalo de confiança de 95%, recorrendo ao *software* de análise de dados, *STATISTICA*. A análise da normalidade dos resíduos e os gráficos que representam esses mesmos resíduos face aos valores previstos e observados foram obtidos para verificar a existência de outros fatores que influenciem as respostas e a consistência do modelo. As respostas avaliadas foram as mesmas que foram alvo de análise no Capítulo 4.2.

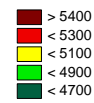
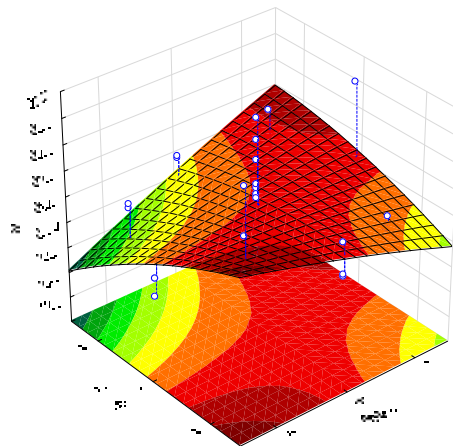
Em primeiro lugar foram avaliadas as características mecânicas que resultam como *output* do *Ball Test*, isto é, foram avaliadas a força na rotura ( $F_b$ ), o deslocamento na rotura ( $S_b$ ), a força máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ ) e o trabalho ( $W$ ) das peças com a alteração dos parâmetros de pressurização. Após a construção das respetivas tabelas ANOVA concluiu-se que a força na rotura, a força máxima e o trabalho não apresentam fatores significativos que afetem as suas respostas. No entanto, analisando a Figura 4.6, verifica-se existir uma maior influência do fator Pressão, tal como se havia verificado na análise S/N.



a)



b)



c)

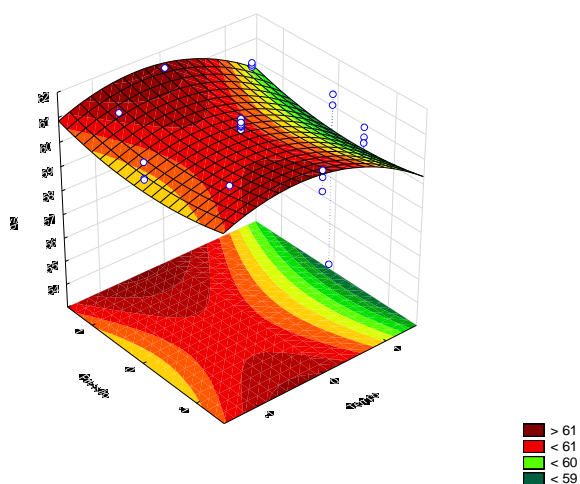
**Figura 4.6** – Superfície de resposta ajustada de: a)  $F_b = f(t, P)$ ; b)  $F_{m\acute{a}x} = f(t, P)$ ; c)  $W = f(t, P)$



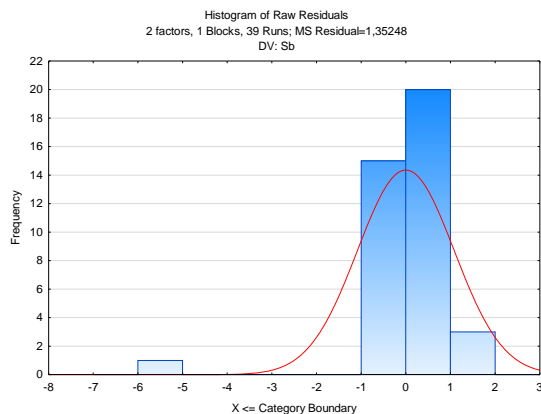
⇒ *Deslocamento na rotura ( $S_b$ )*

**Tabela 4.8** – Tabela de análise de variância para testar a adequação do modelo de  $S_b$

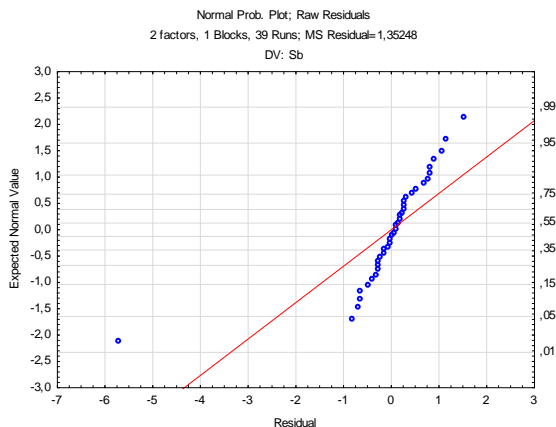
Fator	ANOVA; Var.: $S_b$ ; $R^2 = 0,22286$ ; $\bar{R}^2 = 0,10511$ 2 fatores, 1 bloco, 39 experiências				
	SS	df	MS	F	p
t (L)	4,35178	1	4,351784	3,217633	0,082017
<b>t (Q)</b>	<b>6,27968</b>	<b>1</b>	<b>6,279676</b>	<b>4,643083</b>	<b>0,038573</b>
P (L)	0,20886	1	0,208859	0,154427	0,696867
P (Q)	1,11649	1	1,116487	0,825511	0,370162
t x P	0,01148	1	0,011482	0,008490	0,927143
Erro	44,63184	33	1,352480		
Total SS	57,43084	38			



**Figura 4.7** – Superfície de resposta ajustada de  $S_b = f(t, P)$

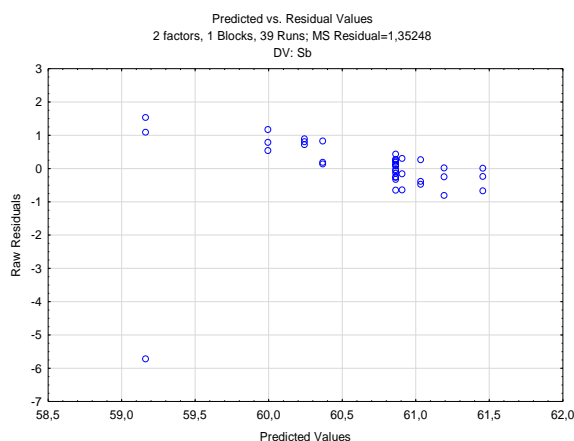


a)

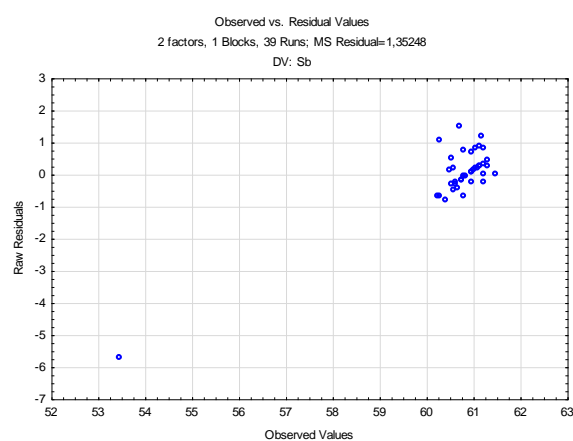


b)

**Figura 4.8** – Teste de normalidade dos resíduos de  $S_b$ : **a)** histograma de resíduos; **b)** gráfico de probabilidade normal dos resíduos



a)



b)

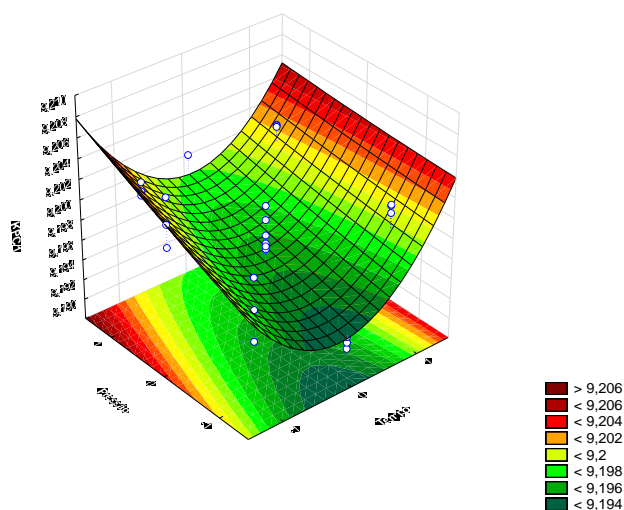
**Figura 4.9** – Análise dos resíduos de  $S_b$  face: **a)** aos valores previstos pelo modelo ajustado; **b)** aos valores observados nas experiências

Da tabela ANOVA referente ao estudo do deslocamento na rotura ( $S_b$ ) retira-se que o tempo (termo quadrático) é o único fator de pressurização que influencia a resposta. O valor do coeficiente de determinação é baixo, o que demonstra pouca adequação do modelo e com base na Figura 4.8 e na Figura 4.9 verifica-se falta de ajuste do modelo pois os resíduos não estão normalmente distribuídos nem apresentam um comportamento aleatório.

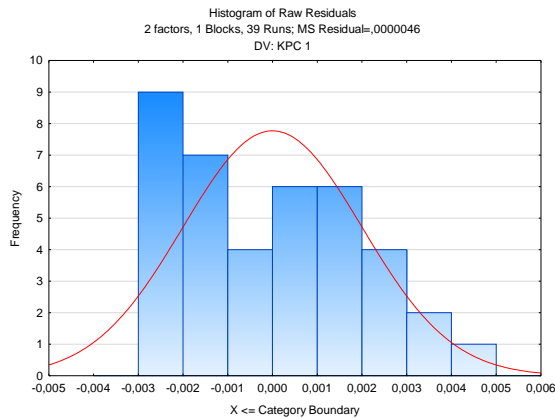
⇒ *Diâmetro interior na zona de posicionamento dos terminais (KPC 1)*

**Tabela 4.9** – Tabela de análise de variância para testar a adequação do modelo de KPC 1

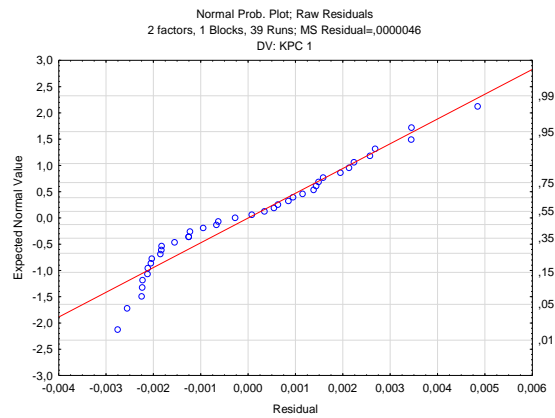
Fator	ANOVA; Var.: KPC 1; $R^2= 0,71009$ ; $\bar{R}^2= 0,66616$ 2 fatores, 1 bloco, 39 experiências				
	SS	df	MS	F	P
t (L)	0,000002	1	0,000002	0,43203	0,515554
<b>t (Q)</b>	<b>0,000299</b>	<b>1</b>	<b>0,000299</b>	<b>64,85834</b>	<b>0,000000</b>
<b>P (L)</b>	<b>0,000061</b>	<b>1</b>	<b>0,000061</b>	<b>13,15488</b>	<b>0,000957</b>
P (Q)	0,000000	1	0,000000	0,01789	0,894399
t x P	0,000007	1	0,000007	1,52773	0,225180
Erro	0,000152	33	0,000005		
Total SS	0,000526	38			



**Figura 4.10** – Superfície de resposta ajustada de KPC 1 =  $f(t, P)$

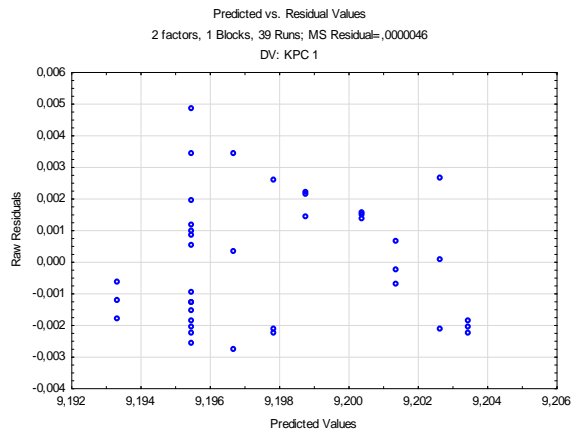


a)

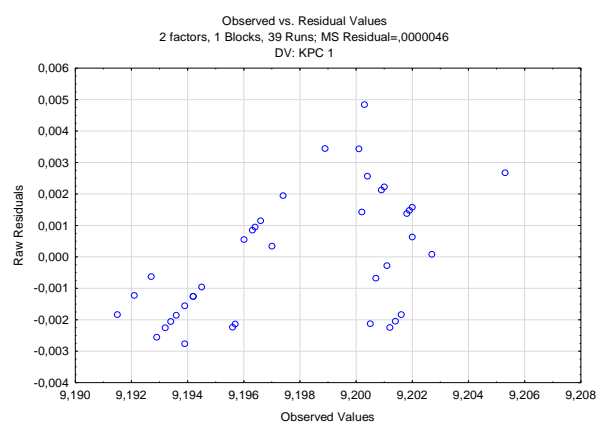


b)

**Figura 4.11** – Teste de normalidade dos resíduos de KPC 1: a) histograma de resíduos; b) gráfico de probabilidade normal dos resíduos

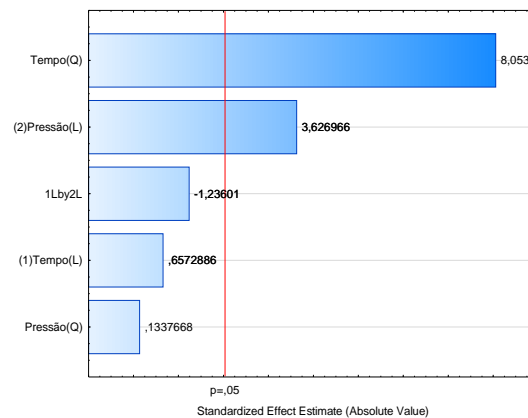


a)



b)

**Figura 4.12** – Análise dos resíduos de KPC 1 face: a) aos valores previstos pelo modelo ajustado; b) aos valores observados nas experiências



**Figura 4.13** – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para a resposta KPC 1

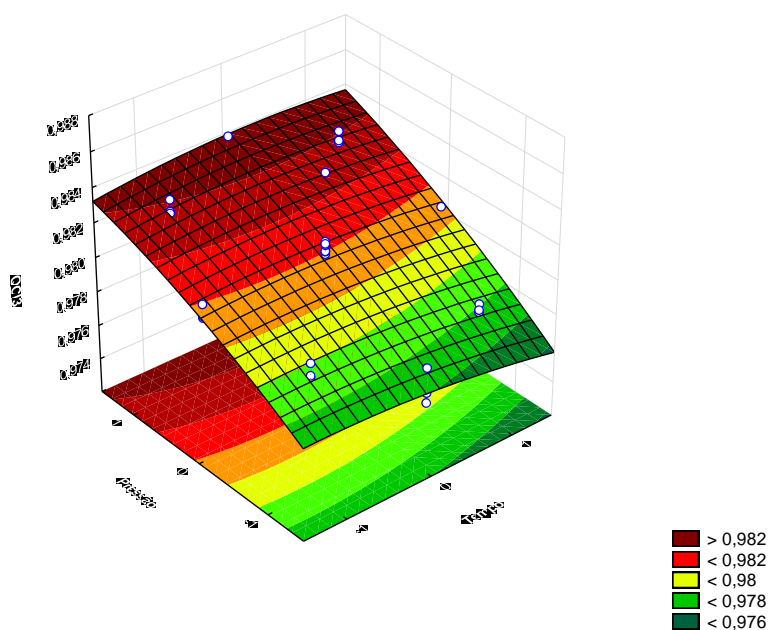
Uma vez realizada a análise estatística referente ao diâmetro interior na zona dos terminais (KPC 1), pode-se observar o seguinte:

- Os fatores que influenciam a resposta KPC 1 são o tempo (termo quadrático) e a pressão (termo linear), sendo que o termo de interação entre estas variáveis não é significativo. Pelo gráfico de Pareto verifica-se que o tempo influencia de forma significativa a resposta comparativamente à pressão;
- O valor do coeficiente de determinação,  $R^2$ , é aceitável, o que indica adequação do modelo;
- Pela análise da normalidade dos resíduos e da sua distribuição aleatória face aos valores previstos e observados, conclui-se que não existem outros fatores a influenciar significativamente a resposta.

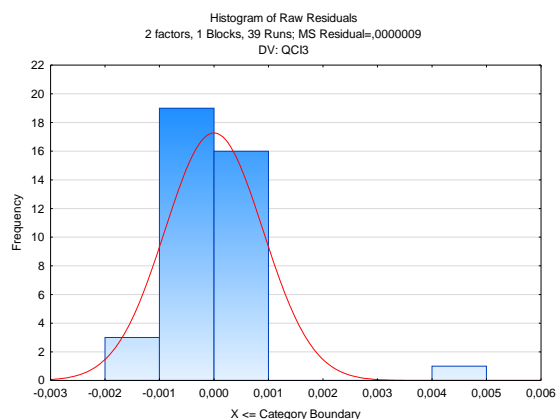
⇒ *Espessura de parede na secção de corte C (QCI 3)*

**Tabela 4.10** – Tabela de análise de variância para testar a adequação do modelo de QCI 3

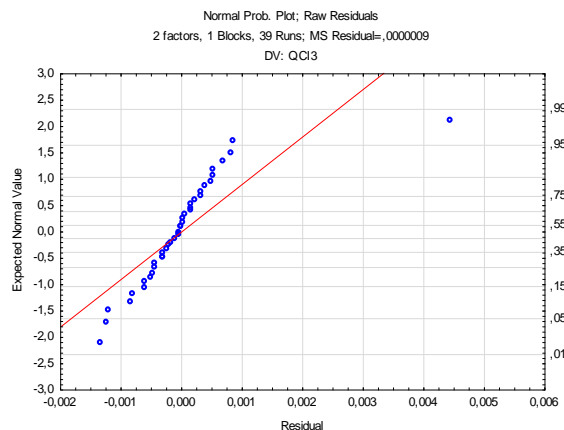
Fator	ANOVA; Var.: QCI 3; $R^2 = 0,8073$ ; $\bar{R}^2 = 0,7781$ 2 fatores, 1 bloco, 39 experiências				
	SS	df	MS	F	p
t (L)	0,000001	1	0,000001	0,9299	0,341891
t (Q)	0,000001	1	0,000001	0,8351	0,367438
<b>P (L)</b>	<b>0,000126</b>	<b>1</b>	<b>0,000126</b>	<b>134,5882</b>	<b>0,000000</b>
P (Q)	0,000001	1	0,000001	1,4862	0,231453
t x P	0,000001	1	0,000001	0,6624	0,421532
Erro	0,000031	33	0,000001		
Total SS	0,000160	38			



**Figura 4.14** – Superfície de resposta ajustada de QCI 3 = f (t,P)

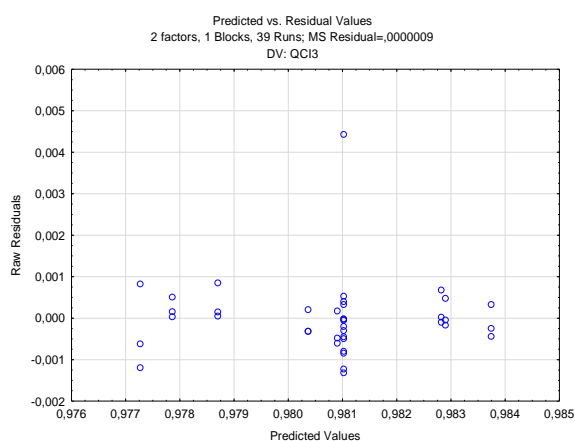


a)

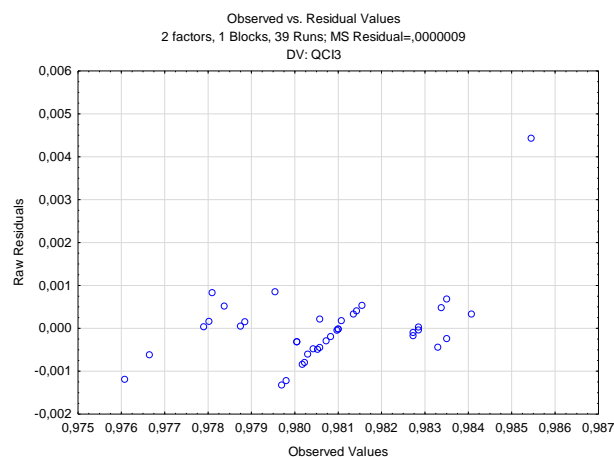


b)

**Figura 4.15** – Teste de normalidade dos resíduos de QCI 3: a) histograma de resíduos; b) gráfico de probabilidade normal dos resíduos



a)



b)

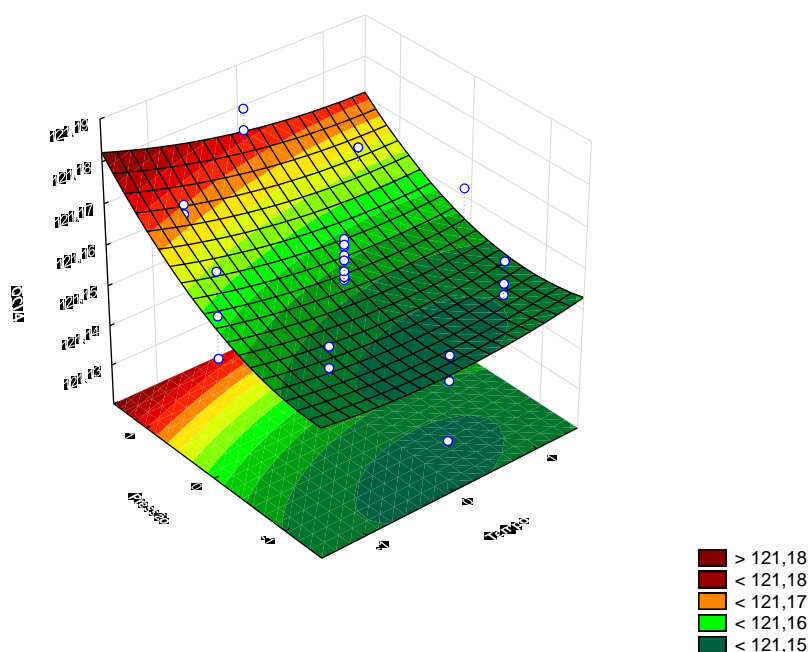
**Figura 4.16** – Análise dos resíduos de QCI 3 face: a) aos valores previstos pelo modelo ajustado; b) aos valores observados nas experiências

No que diz respeito à espessura de parede na secção de corte C (QCI 3), verifica-se que o único parâmetro de pressurização significativo para esta resposta é a pressão (termo linear). Pelo valor elevado do coeficiente de determinação verifica-se que o modelo consegue representar de uma forma bastante satisfatória a resposta, mas no entanto pelo que se observa na Figura 4.15 e na Figura 4.16, verifica-se alguma falta de ajuste do modelo pois os resíduos não estão normalmente distribuídos nem apresentam um comportamento aleatório.

⇒ *Comprimento da case (QCI 4)*

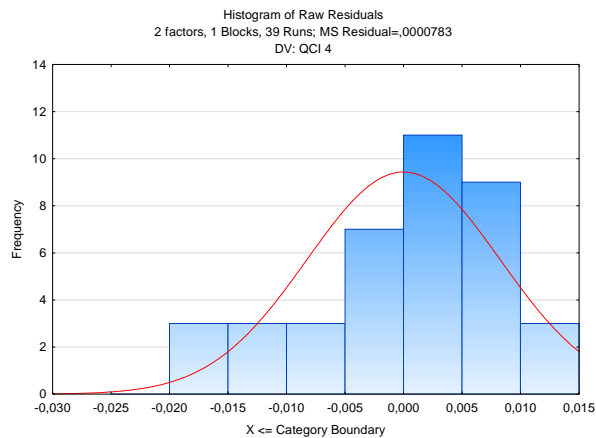
**Tabela 4.11** – Tabela de análise de variância para testar a adequação do modelo de QCI 4

Fator	ANOVA; Var.: QCI 4; $R^2 = 0,429$ ; $\bar{R}^2 = 0,34249$ 2 fatores, 1 bloco, 39 experiências				
	SS	df	MS	F	p
t (L)	0,000066	1	0,000066	0,84598	0,364368
t (Q)	0,000031	1	0,000031	0,39694	0,533012
<b>P (L)</b>	<b>0,001571</b>	<b>1</b>	<b>0,001571</b>	<b>20,05824</b>	<b>0,000085</b>
P (Q)	0,000271	1	0,000271	3,46114	0,071759
t x P	0,000022	1	0,000022	0,27585	0,602948
Erro	0,002584	33	0,000078		
Total SS	0,004526	38			

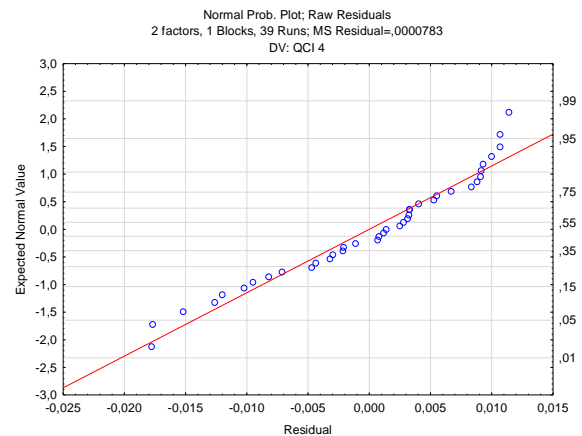


**Figura 4.17** – Superfície de resposta ajustada de QCI 4 = f (t,P)



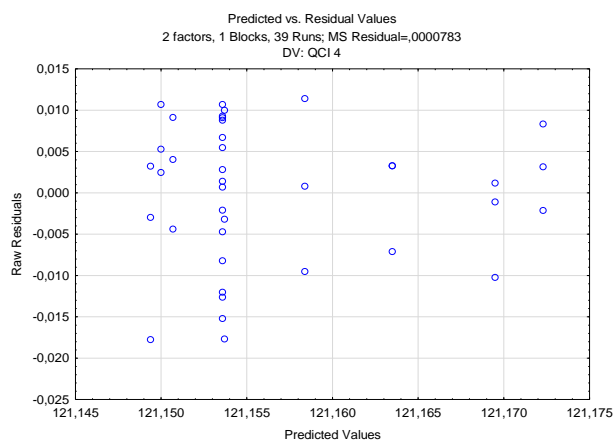


a)

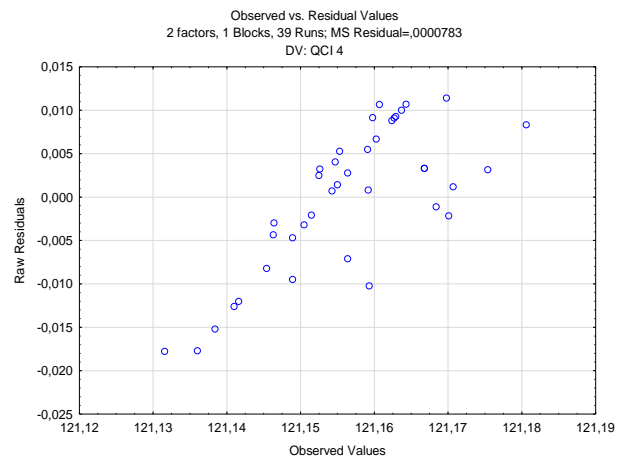


b)

**Figura 4.18** – Teste de normalidade dos resíduos de QCI 4: a) histograma de resíduos; b) gráfico de probabilidade normal dos resíduos



a)



b)

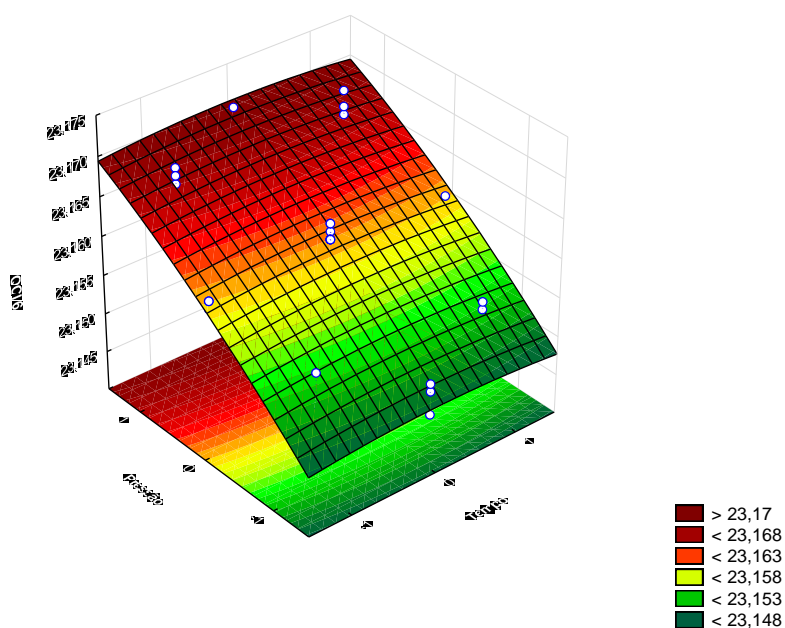
**Figura 4.19** – Análise dos resíduos de QCI 4 face: a) aos valores previstos pelo modelo ajustado; b) aos valores observados nas experiências

Da tabela ANOVA referente ao estudo do comprimento da *case* (QCI 4) retira-se que a pressão é o único fator de pressurização que influencia a resposta. O valor do coeficiente de determinação é baixo, o que demonstra pouca adequação do modelo e com base na Figura 4.18 constata-se que os resíduos se encontram normalmente distribuídos. No entanto, na análise dos resíduos face aos valores previstos e observados verificou-se um padrão de distribuição que não é aleatório, o que mostra falta de ajuste do modelo.

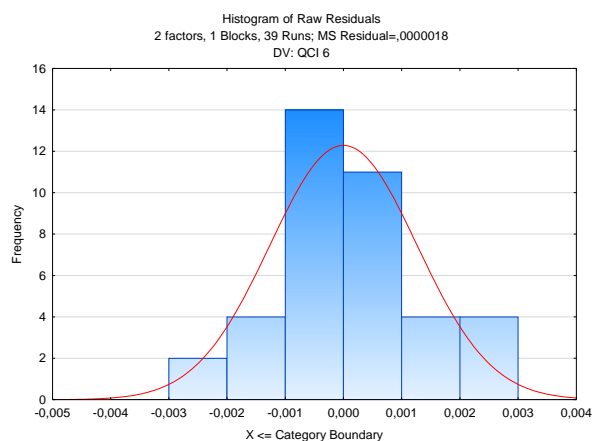
⇒ *Diâmetro exterior na secção de corte C (QCI 6)*

**Tabela 4.12** – Tabela de análise de variância para testar a adequação do modelo de QCI 6

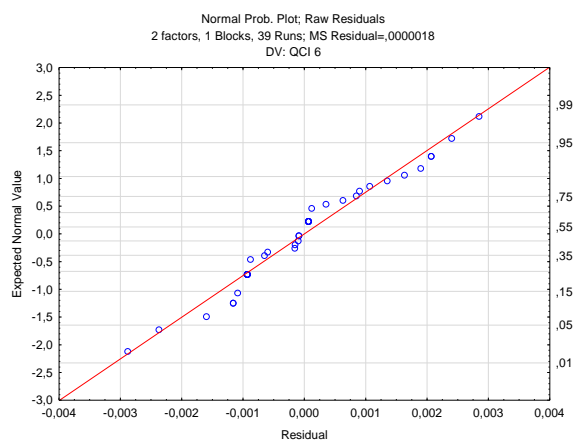
Fator	ANOVA; Var.: QCI 6; $R^2 = 0,95431$ ; $\bar{R}^2 = 0,94739$ 2 fatores, 1 bloco, 39 experiências				
	SS	df	MS	F	p
t (L)	0,000000	1	0,000000	0,0077	0,930416
t (Q)	0,000003	1	0,000003	1,8460	0,183459
<b>P (L)</b>	<b>0,001262</b>	<b>1</b>	<b>0,001262</b>	<b>683,3097</b>	<b>0,000000</b>
<b>P (Q)</b>	<b>0,000009</b>	<b>1</b>	<b>0,000009</b>	<b>4,8361</b>	<b>0,034985</b>
t x P	0,000000	1	0,000000	0,0000	1,000000
Erro	0,000061	33	0,000002		
Total SS	0,001334	38			



**Figura 4.20** – Superfície de resposta ajustada de QCI 6 =  $f(t, P)$

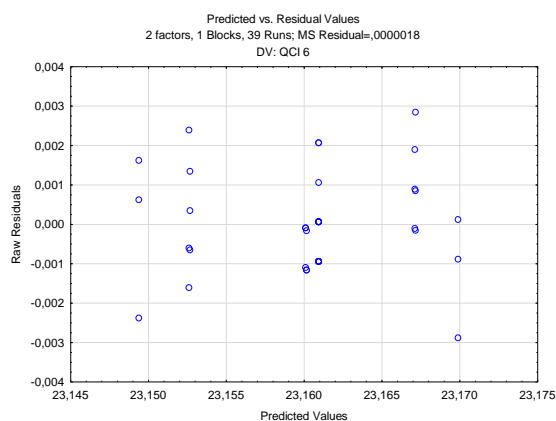


a)

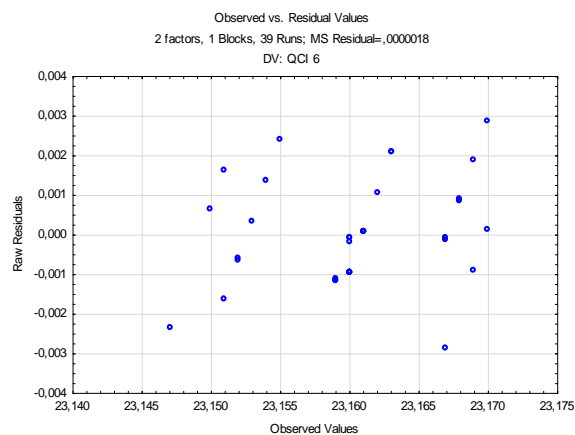


b)

**Figura 4.21** – Teste de normalidade dos resíduos de QCI 6: a) histograma de resíduos; b) gráfico de probabilidade normal dos resíduos

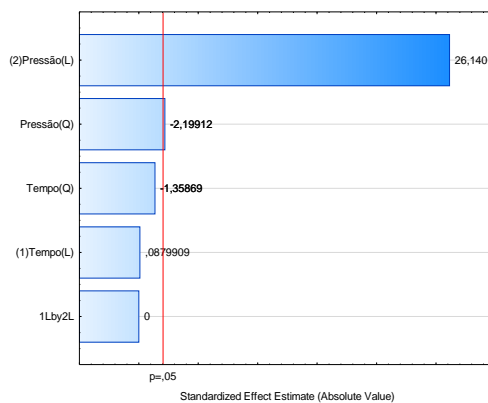


a)



b)

**Figura 4.22** – Análise dos resíduos de QCI 6 face: a) aos valores previstos pelo modelo ajustado; b) aos valores observados nas experiências



**Figura 4.23** – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para a resposta QCI 6

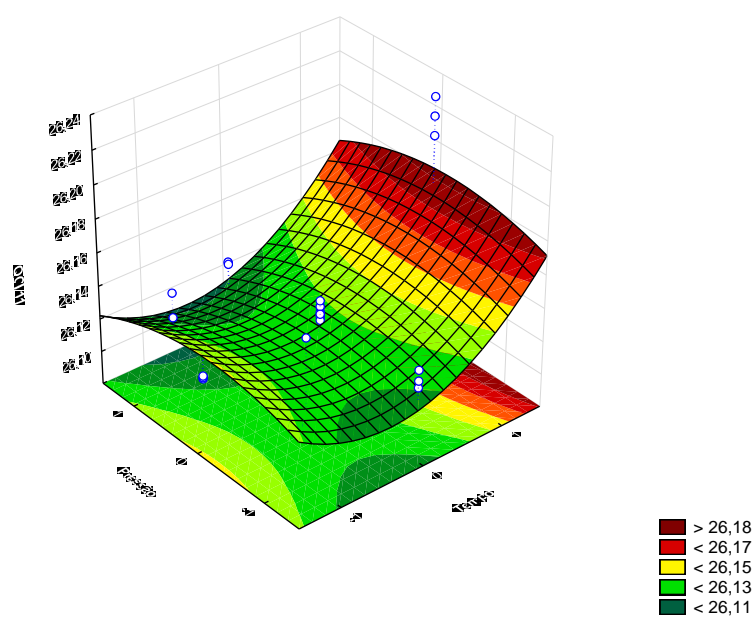
Relativamente ao diâmetro exterior na secção de corte C (QCI 6), pode-se observar:

- Apenas a pressão influencia significativamente a resposta. No entanto quer o termo linear, quer o termo quadrático são estatisticamente significativos. Já o termo de interação não tem qualquer expressão nesta resposta;
- Pelo gráfico de Pareto observa-se que a componente linear da pressão é bastante mais significativa que a sua componente quadrática;
- O valor do coeficiente de determinação,  $R^2$ , é elevado, o que indica que o modelo representa em mais de 95% aquilo que é a resposta QCI 6;
- Pela análise da normalidade dos resíduos e da sua distribuição aleatória face aos valores previstos e observados, conclui-se que não existem outros fatores a influenciar significativamente a resposta.

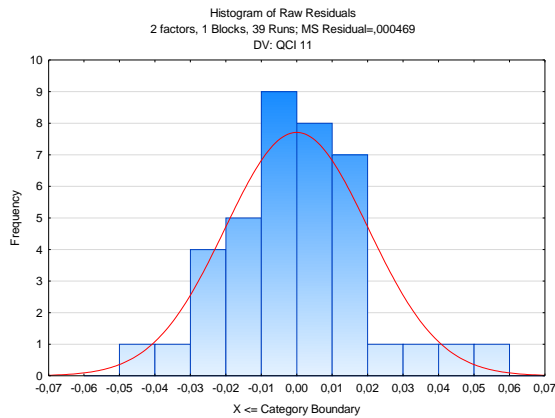
⇒ *Diâmetro exterior da base da case (QCI 11)*

**Tabela 4.13** – Tabela de análise de variância para testar a adequação do modelo de QCI 11

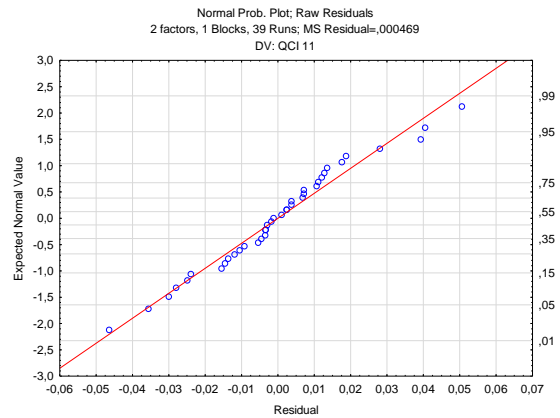
Fator	ANOVA; Var.: QCI 11; $R^2 = 0,42637$ ; $\bar{R}^2 = 0,33945$ 2 fatores, 1 bloco, 39 experiências				
	SS	df	MS	F	p
t (L)	0,004669	1	0,004669	9,92888	0,003450
t (Q)	0,005118	1	0,005118	10,88434	0,002331
P (L)	0,000159	1	0,000159	0,33816	0,564843
P (Q)	0,000909	1	0,000909	1,93201	0,173845
t x P	0,000003	1	0,000003	0,00596	0,938922
Erro	0,015518	33	0,000470		
Total SS	0,027052	38			



**Figura 4.24** – Superfície de resposta ajustada de QCI 11 =  $f(t, P)$

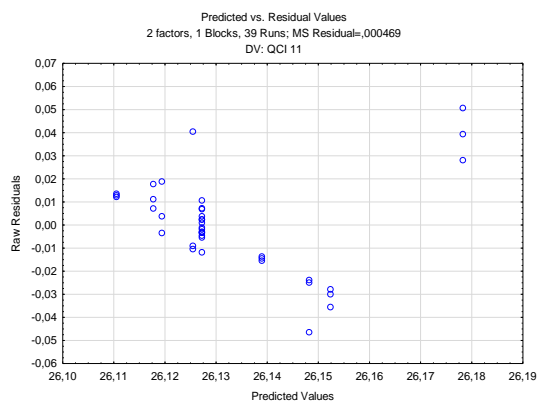


a)

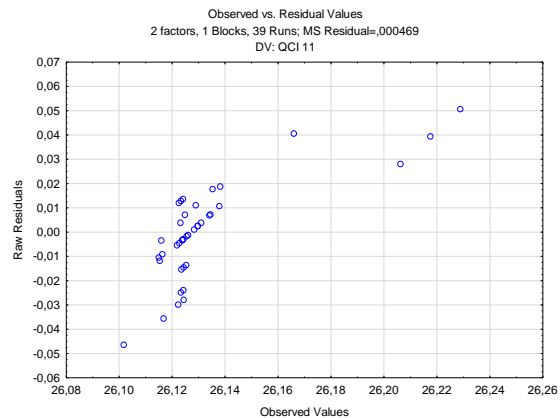


b)

**Figura 4.25** – Teste de normalidade dos resíduos de QCI 11: a) histograma de resíduos; b) gráfico de probabilidade normal dos resíduos

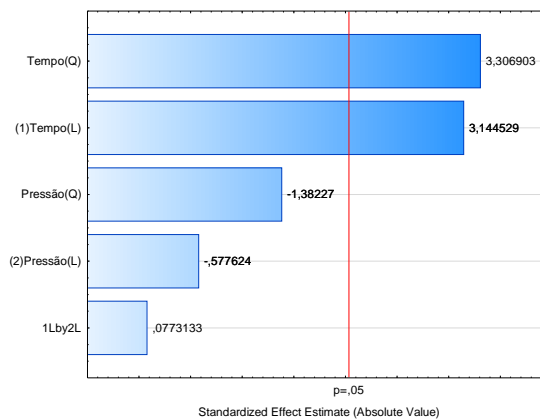


a)



b)

**Figura 4.26** – Análise dos resíduos de QCI 11 face: a) aos valores previstos pelo modelo ajustado; b) aos valores observados nas experiências



**Figura 4.27** – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para a resposta QCI 11

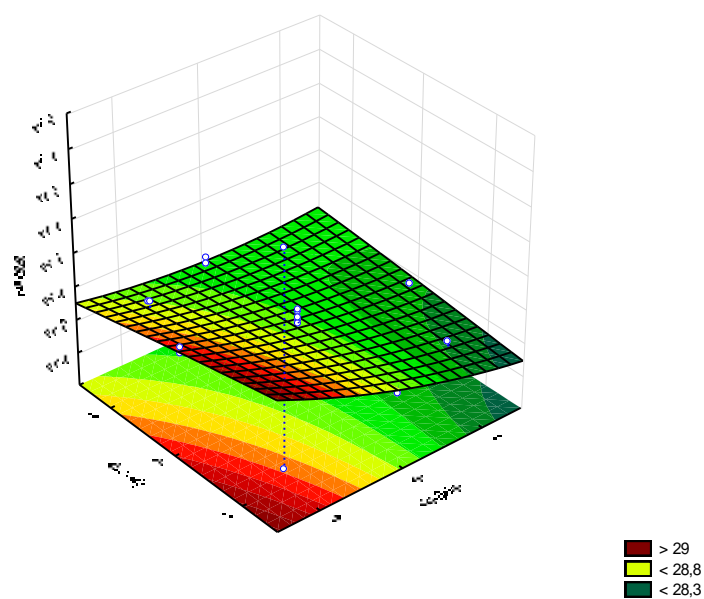
No que diz respeito ao diâmetro exterior da base da *case* (QCI 11), pode-se observar o seguinte:

- Apenas o tempo influencia significativamente o QCI 11. No entanto quer o termo linear, quer o termo quadrático são estatisticamente significativos. Já o termo de interação não tem qualquer expressão nesta resposta;
- Pelo gráfico de Pareto observa-se que a componente quadrática do tempo é ligeiramente mais significativa que a sua componente linear;
- O valor do coeficiente de determinação,  $R^2$ , é baixo, o que revela pouca adequação do modelo;
- Pela análise da normalidade dos resíduos e da sua distribuição aleatória face aos valores previstos e observados, conclui-se que não existem outros fatores a influenciar significativamente a resposta.

⇒ *Comprimento da torre (QCI 12)*

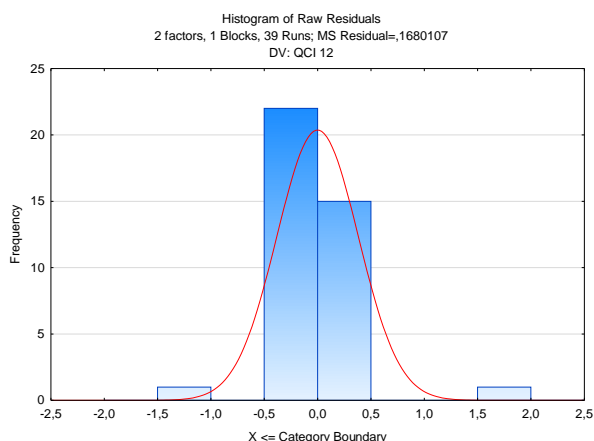
**Tabela 4.14** – Tabela de análise de variância para testar a adequação do modelo de QCI 12

Fator	ANOVA; Var.: QCI 12; $R^2 = 0,21667$ ; $\bar{R}^2 = 0,09798$ 2 fatores, 1 bloco, 39 experiências				
	SS	df	MS	F	p
t (L)	1,226623	1	1,226623	7,300865	0,010799
t (Q)	0,079416	1	0,079416	0,472684	0,496559
P (L)	0,060900	1	0,060900	0,362477	0,551249
P (Q)	0,000507	1	0,000507	0,003018	0,956520
t x P	0,163053	1	0,163053	0,970495	0,331725
Erro	5,544352	33	0,168011		
Total SS	7,077919	38			

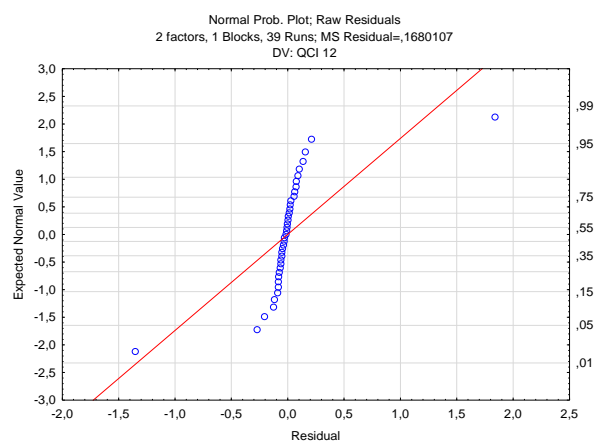


**Figura 4.28** – Superfície de resposta ajustada de QCI 12 =  $f(t, P)$



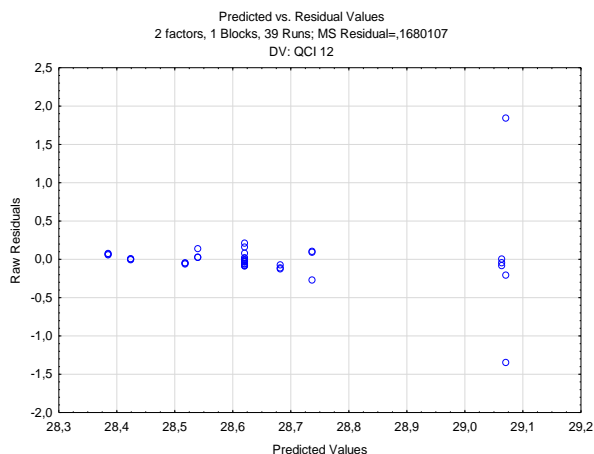


a)

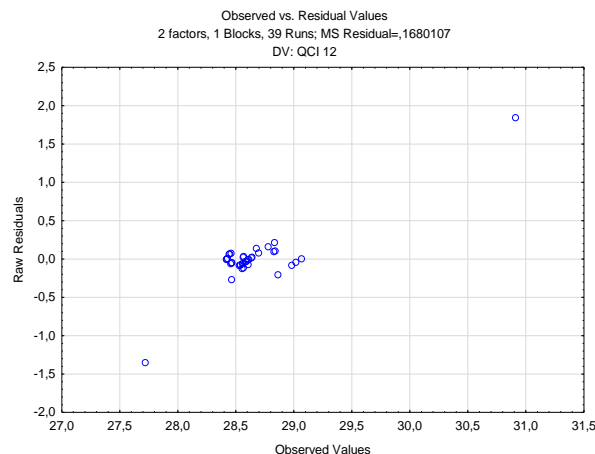


b)

**Figura 4.29** – Teste de normalidade dos resíduos de QCI 12: **a)** histograma de resíduos; **b)** gráfico de probabilidade normal dos resíduos



a)



b)

**Figura 4.30** – Análise dos resíduos de QCI 12 face: **a)** aos valores previstos pelo modelo ajustado; **b)** aos valores observados nas experiências

Do estudo estatístico efetuado para esta resposta, conclui-se que o comprimento da torre (QCI 12) é apenas influenciado pelo tempo de pós-pressão e que o valor de  $R^2$  calculado é baixo, o que indica que o modelo não estima com precisão a resposta. No entanto pelo que se observa na Figura 4.29 e na Figura 4.30, verifica-se falta de ajuste do modelo pois os resíduos não estão normalmente distribuídos nem apresentam um comportamento aleatório.

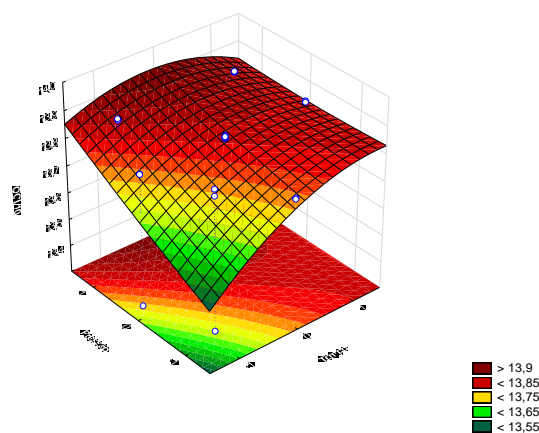
⇒ *Massa mínima das peças (QCI 10)*

**Tabela 4.15** – Tabela de análise de variância para testar a adequação do modelo de QCI 10

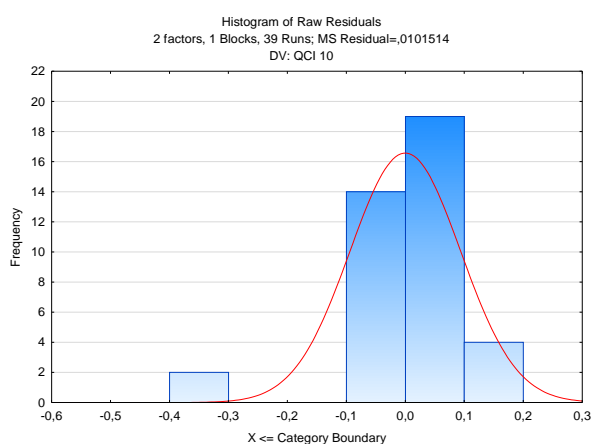
Fator	ANOVA; Var.: QCI 10; $R^2 = 0,33096$ ; $\bar{R}^2 = 0,22959$ 2 fatores, 1 bloco, 39 experiências				
	SS	df	MS	F	p
<b>t (L)</b>	<b>0,052777</b>	<b>1</b>	<b>0,052777</b>	<b>5,198956</b>	<b>0,029193</b>
t (Q)	0,026289	1	0,026289	2,589651	0,117090
<b>P (L)</b>	<b>0,070485</b>	<b>1</b>	<b>0,070485</b>	<b>6,943404</b>	<b>0,012715</b>
P (Q)	0,000282	1	0,000282	0,027765	0,868678
t x P	0,014700	1	0,014700	1,448079	0,237398
Erro	0,334995	33	0,010151		
Total SS	0,500710	38			

Depois de efetuada a análise estatística referente à massa mínima das peças (QCI 10), pode-se observar o seguinte:

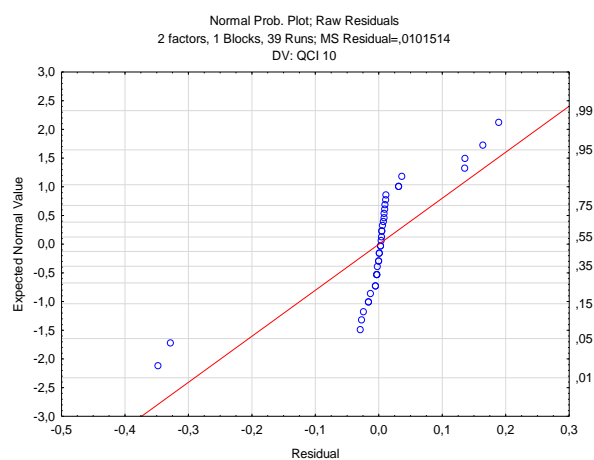
- A resposta é influenciada por ambos os fatores de pressurização (tempo e pressão). Destes, apenas os respetivos termos lineares se mostraram significativos e uma vez mais o termo de interação entre estas variáveis não é significativo. Pela Figura 4.34 verifica-se que a pressão influencia de forma mais significativa a resposta comparativamente com o tempo;
- O valor do coeficiente de determinação,  $R^2$ , é baixo, o que indica pouca adequação do modelo;
- Pela análise da normalidade dos resíduos e da sua distribuição aleatória face aos valores previstos e observados, conclui-se que existe falta de ajuste do modelo pois os resíduos não apresentam um comportamento aleatório.



**Figura 4.31** – Superfície de resposta ajustada de QCI 10 =  $f(t, P)$

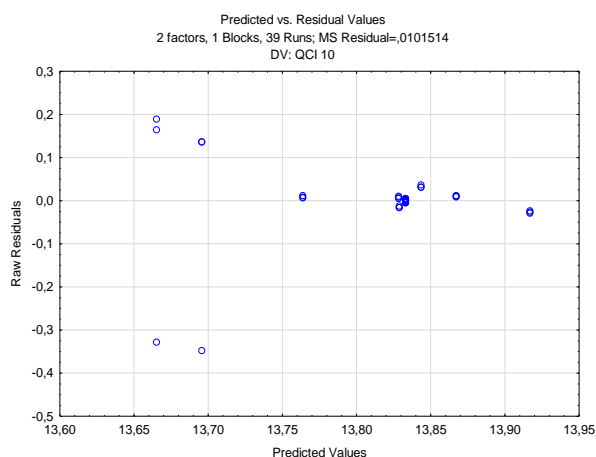


**a)**

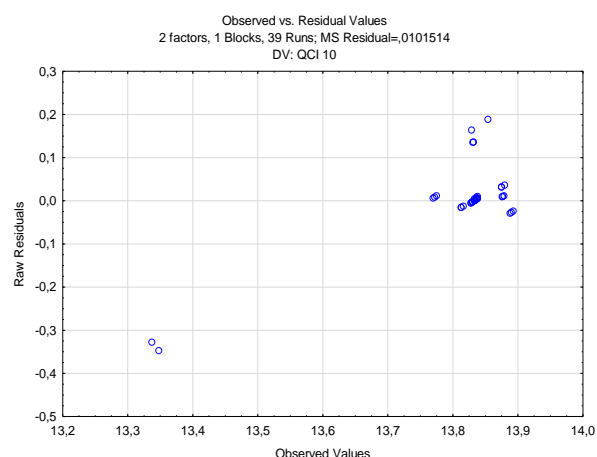


**b)**

**Figura 4.32** – Teste de normalidade dos resíduos de QCI 10: **a)** histograma de resíduos; **b)** gráfico de probabilidade normal dos resíduos

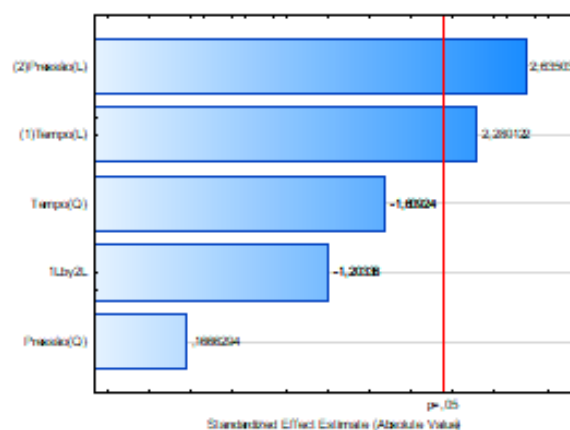


**a)**



**b)**

**Figura 4.33** – Análise dos resíduos de QCI 10 face: **a)** aos valores previstos pelo modelo ajustado; **b)** aos valores observados nas experiências



**Figura 4.34** – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para a resposta QCI 10

Os fatores significativos para cada resposta e os respectivos efeitos são resumidos na Tabela 4.16. Apesar de alguns dos modelos acima apresentados não estimarem com precisão a resposta devido ao baixo coeficiente de determinação ou apresentarem uma falta de ajuste, verifica-se, no entanto, que os resultados obtidos são consistentes com o processo físico. Como tal, apesar de os resultados não serem precisos em termos quantitativos, pode considerar-se que o comportamento das respostas face à variação dos fatores pode constituir um contributo para o estudo das variáveis em questão [45].

Os modelos empíricos obtidos deste estudo e que têm por base os modelos de segunda ordem apresentados no Capítulo 3.5, são apresentados na Tabela 4.17. Cada um destes modelos serve para estimar o valor de cada uma das respostas de estudo e foi construído com base nos coeficientes de regressão (referentes aos fatores significativos) obtidos pelo teste t de Student, após aplicação da Metodologia de Superfície de Resposta.

**Tabela 4.16** – Resumo dos fatores significativos e respectivos efeitos para cada resposta

Resposta	Fatores significativos	Efeito
$S_b$	Tempo (t)	$< S_b \text{ se } > (t)$
KPC 1	Tempo (t) e Pressão (P)	$> \text{KPC 1 se } > (P)$ Valor mínimo para nível 0 de (t)
QCI 3	Pressão (P)	$> \text{QCI 3 se } > (P)$
QCI 4	Pressão (P)	$> \text{QCI 4 se } > (P)$
QCI 6	Pressão (P)	$> \text{QCI 6 se } > (P)$
QCI 11	Tempo (t)	$> \text{QCI 11 se } > (t)$
QCI 12	Tempo (t)	$< \text{QCI 12 se } > (t)$
QCI 10	Tempo (t) e Pressão (P)	$> \text{QCI 10 se } > (P)$ $> \text{QCI 10 se } > (t)$

**Tabela 4.17** – Modelos empíricos obtidos

Resposta	Modelo empírico
$S_b$	$S_b = 60,86176 - 0,54854t^2$
KPC 1	$\text{KPC 1} = 9,195453 + 0,001591P + 0,003788t^2$
QCI 3	$\text{QCI 3} = 0,981020 + 0,002289P$
QCI 4	$\text{QCI 4} = 121,1536 + 0,0081P$
QCI 6	$\text{QCI 6} = 23,16093 + 0,00725P - 0,00065P^2$
QCI 11	$\text{QCI 11} = 26,12725 + 0,01390t + 0,01568t^2$
QCI 12	$\text{QCI 12} = 28,62063 - 0,22607t$
QCI 10	$\text{QCI 10} = 13,83307 + 0,04689t + 0,05419P$



## Conclusões e Trabalho Futuro

### 5.1 Conclusões e contribuições

O estudo conduzido nesta dissertação teve como principal objetivo a análise da influência dos parâmetros de pressurização nas características dimensionais e mecânicas de peças termoplásticas obtidas para a indústria automóvel. De modo a cumprir esse objetivo traçado, foi utilizada a Metodologia de Superfície de Resposta associada a um planeamento composto central, como meio para analisar o efeito que a variação dos níveis dos parâmetros de pressurização provoca nas respostas de estudo.

No que diz respeito aos resultados experimentais, as conclusões relativamente aos efeitos das variáveis de entrada nas respostas foram exaustivamente tratadas no capítulo anterior. Neste capítulo são apenas referidas as principais conclusões, sendo essas:

- ⇒ A construção do *Bill of Process* da área de injeção de plásticos da Delphi Technologies permitiu apontar e esquematizar todos os *inputs*, *outputs* e características dos equipamentos funcionais que influenciam o processo de moldação por injeção implementado. Este documento, que também serve como ferramenta de auxílio para a preparação de moldes, servirá de *roadmap* para futuras implementações de novos moldes.
- ⇒ As novas folhas de *setup*, distintas para máquinas mais antigas e mais recentes, contêm mais informação relativamente ao processo de injeção, com espaços dedicados para apresentação dos resultados obtidos para cada um dos testes de preparação do molde e para outros testes a serem implementados futuramente. Nestas folhas é também dada particular importância à forma como graficamente o processo é representado, com a implementação de espaços para gráficos de resultados como o gráfico de injeção e os gráficos de cada um dos testes que compõem o estudo dos 6 passos, que permite uma maior compreensão do comportamento dos principais parâmetros ao longo do ciclo de moldação.
- ⇒ Os resultados da preparação do molde, baseada no estudo dos 6 passos, foram indispensáveis para a regulação paramétrica do molde e para o preenchimento da folha de *setup* do molde de injeção validado. Os *outputs* provenientes dos testes da janela de processo e da solidificação do

ponto de injeção são especialmente importantes neste estudo pois foram estes que ajudaram a definir os níveis dos fatores incluídos no Desenho de Experiências aplicado.

- ⇒ A aplicação da Metodologia de Superfície de Resposta demonstrou-se eficaz para realização da análise da influência dos parâmetros de pressurização nas características dimensionais e mecânicas das *cases*. Alguns dos modelos ajustados obtidos apresentam uma baixa adequação, pelo que se conclui serem pouco conclusivos do ponto de vista quantitativo. Tal facto é justificado pela interação de parâmetros referentes a outras fases do processo de moldação por injeção que presumivelmente afetam as respostas e que não foram considerados no Desenho de Experiências. No entanto, os fatores considerados significativos são fisicamente coerentes, o que indicia que se podem considerar as tendências das variáveis das superfícies de resposta.

Finalmente, pode afirmar-se que os objetivos propostos para o presente trabalho foram atingidos no que diz respeito à análise da influência dos parâmetros de pressurização nas características dimensionais e mecânicas de peças termoplásticas obtidas para a indústria automóvel.

No que diz respeito ao contributo científico e tecnológico para a empresa, este trabalho foi de enorme importância porque permitiu estabelecer uma nova linha de pensamento no que diz respeito à análise de processo e validação de futuros moldes. O BoP e as *folhas de setup* servirão como guia para qualquer futuro funcionário do departamento de injeção de plásticos da empresa. Por outro lado, desmistificou-se a importância dada à influência dos parâmetros de pressurização nas propriedades mecânicas das peças, que se revelou inexistente.

## 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Ao longo da investigação apresentada neste trabalho notaram-se alguns aspetos possíveis de melhorar a qualidade dos resultados. Posto isto, sugere-se como trabalho futuro a abordagem dos seguintes aspetos:

- ⇒ Juntamente com o *Bill of Process* aqui discutido, adicionar os fluxogramas de processo (PFD), os planos de controlo de processo (PCP) e as análises dos modos e efeitos de falha potencial de processo (PFMEA) de modo a construir um único documento que servirá de referência para toda a área de injeção de plástico da Delphi Seixal quer para todos os funcionários já existentes como para os que possam vir a ser integrados na empresa.
- ⇒ Realização de um estudo semelhante, mas que no qual o Desenho de Experiências inclua outros fatores que presumivelmente afetam as características físicas e mecânicas do material polimérico, como a temperatura do molde, a temperatura do fundido, a velocidade de injeção e o tempo de arrefecimento. Especial destaque para a variação da temperatura do molde (variando



a temperatura da água nos termorreguladores) a fim de analisar as oscilações de temperatura observadas durante o processo.

- ⇒ Na futura preparação de moldes deverá ser adicionado um estudo de análise da capacidade da bomba hidráulica presente na máquina injetora. Este estudo tem como objetivo identificar, para cada máquina, a pressão hidráulica a partir da qual a velocidade de injeção (determinada pelo teste de viscosidade) não consegue ser alcançada, ou consegue, mas com alguma hesitação. Assim, sempre que possível, garante-se que o valor do pico de pressão de injeção consegue ser atingido, não limitando o processo em termos de pressão. Este estudo será particularmente interessante de ser feito em moldes de injeção que produzam peças como primários ou secundários (componentes plásticos pertencentes às bobinas de ignição) dado que é relatado pela empresa que são estes que tipicamente suscitam mais problemas em termos de pressão, durante a fase de preparação do molde. A implementação deste estudo já foi discutida com a empresa, pelo que as novas folhas de *setup* já contêm os espaços correspondentes. Tendo em conta os valores de pressão hidráulica obtidos neste estudo, será ainda necessário construir o gráfico da pressão da bomba em função do diâmetro do fuso existente na máquina (pressão de injeção específica). Graças a este gráfico passa a ser possível estimar a pressão específica de injeção para esses valores para evitar variações de máquina para máquina.
- ⇒ Análise das capacidades referentes aos valores dos parâmetros de processo considerados como prioritários para análise e obtidos na preparação do molde, nomeadamente o volume de dosagem, o tempo de injeção, o pico de pressão de injeção, a almofada e o curso total de dosagem. Na parte de trás da nova folha de *setup* criada está incluído um espaço para representação dos resultados dessas análises (controlo estatístico do processo).



## Referências Bibliográficas

---

- [1] S. Kulkarni, *Robust Process Development and Scientific Molding: Theory and Practice*, 2nd ed. Munich: Hanser Publishers, 2017.
- [2] T. A. Osswald, L.-S. Turng, e P. Gramann, *Injection Molding Handbook*, 2nd ed. Munich: Hanser Publishers, 2008.
- [3] L. Rodrigues, «Aplicação dos métodos de Taguchi e estudo da capacidade do processo: caso de estudo na indústria automóvel», Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2013.
- [4] BERU, «Tudo sobre bobinas de ignição: Informações técnicas n.º 07», Kontich, 2013.
- [5] V. A. W. Hillier e P. Coombes, *Hillier's Fundamentals of Motor Vehicle Technology: Book I*, 5th ed. Cheltenham: Nelson Thornes Ltd, 2004.
- [6] HELLA, «Ignition coils in motor vehicles: Function, diagnosis, troubleshooting», Lippstadt, 2009.
- [7] A. C. Roth, B. J. Fisher, e W. S. Gauthier, *Small Gas Engines - Fundamentals, Service, Troubleshooting, Repair, Applications*, 10th ed. Tinley Park: Goodheart-Willcox, 2012.
- [8] BOSCH, «Ignition Coils and Modules 2013/2014», Clayton, 2014.
- [9] M. Ramos, «Sincronização da Cadeia de Valor através da Integração da Teoria das Restrições e Produção Lean», Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2010.
- [10] PlasticsEurope - Association of Plastic Manufacturers, «Plastics - the Facts 2014/2015: An analysis of European plastics production, demand and waste data», 2015. [Em linha]. Disponível em: [http://www.plasticseurope.org/documents/document/20111107101127-final\\_pe\\_factsfigures\\_uk2011\\_lr\\_041111.pdf](http://www.plasticseurope.org/documents/document/20111107101127-final_pe_factsfigures_uk2011_lr_041111.pdf). [Acedido: 23-Jul-2019].
- [11] CEFAMOL - Associação Nacional da Indústria de Moldes, «A Indústria Portuguesa de Moldes», Leiria, 2015.
- [12] M. R. Kamal, A. Isayev, e S.-J. Liu, *Injection Molding: Technology and Fundamentals*. Munich: Hanser Publishers, 2009.
- [13] D. V Rosato e M. G. Rosato, *Injection molding handbook*, 3rd ed. Norwell: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [14] E. Cybulski, *Plastic Conversion Processes: A Concise and Applied Guide*. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2009.
- [15] J. Avery, *Injection Molding Alternatives: A Guide for Designers and Product Engineers*. Munich: Hanser Publishers, 1998.
- [16] A. Cunha, A. M. Brito, e A. J. Pontes, *Manual do Projectista para moldes de injeção de plástico: Moldação por injeção e materiais plásticos, Vol.2*. 2003.
- [17] H. Y. Wong, K. T. Fung, e F. Gao, «Development of a transducer for in-line and through cycle monitoring of key process and quality variables in injection molding», *Sensors and Actuators, A: Physical*, vol. 141, n. 2, pp. 712–722, 2008.
- [18] A. M. Brito, A. Matos, e S. S. Mendes, *Manual do Projectista para moldes de injeção de plástico: Sistema de Controlo de Temperatura, Vol. 7*. 2003.

- [19] D. O. Kazmer, *Injection Mold Design Engineering*. Munic: Hanser Publishers, 2007.
- [20] A. J. Pontes, A. M. Brito, A. Matos, B. Araújo, e S. S. Mendes, *Manual do Projectista para moldes de injeção de plástico: Sistema de extracção, Vol.8*. 2003.
- [21] T. J. D. Bom, «Comparação do desempenho de tecnologias alternativas de fabrico de moldes de injeção de plásticos», Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, 2014.
- [22] Summit Systems, «Material Handling: Central Material Feed System», Staffordshire, 2010.
- [23] NOVATEC, «VACUUM LOADERS - VL and VLP Series», Baltimore, 2018.
- [24] R. Neilley, «Central Drying & Conveying of Plastics», Baltimore, 2012.
- [25] DuPont, «Rynite PET: Molding Guide», 1995. [Em linha]. Disponível em: [http://www2.dupont.com/Plastics/en\\_US/assets/downloads/processing/228760D.pdf](http://www2.dupont.com/Plastics/en_US/assets/downloads/processing/228760D.pdf). [Acedido: 10-Jan-2019].
- [26] J. Harada, *Moldes para Injeção de Termoplásticos: projetos e princípios básicos*, 1st ed. São Paulo: Artliber Editora, 2004.
- [27] DuPont, «Rynite PET Design Guide - Module IV», 1995. .
- [28] G. A. Britton, Y. M. Deng, e Y. C. Lam, «Adopting “Scientific Molding” Methodology in a Simulation-Based Approach to Optimize Injection Fill Time», *Journal of Injection Molding Technology*, vol. 6, n. 4, pp. 305–313, 2002.
- [29] Plastics Today, «Scientific Molding, Part 1: Filling», 1998. [Em linha]. Disponível em: <https://www.plasticstoday.com/content/scientific-molding-part-1-filling/3092633971041>. [Acedido: 12-Jan-2019].
- [30] S. Mertes, C. Carlson, J. Bozzelli, e M. Groleau, «What position on the viscosity curve is the most repeatable with respect to end of fill cavity psi.», em *ANTEC 2001 Plastics: The Lone Star, Volume 1: Processing*, 2001, pp. 620–624.
- [31] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 8th ed. Arizona State University, United States of America: John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- [32] Z. Pereira e J. G. Requeijo, *Qualidade: Planeamento e Controlo Estatístico de Processos*, 2nd ed. Lisboa: FFCT - Fundação da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2012.
- [33] G. W. Oehlert, *A First Course in Design and Analysis of Experiments*, vol. 53, n. 9. Michigan: W. H. Freeman, 2010.
- [34] R. H. Myers, D. C. Montgomery, e C. M. Anderson-Cook, *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization using Designed Experiments*, 4th ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2016.
- [35] Enrique Del Castillo, *Process Optimization: A Statistical Approach*. Pennsylvania: Springer, 2007.
- [36] G. E. P. Box e N. R. Draper, *Response Surfaces, Mixtures, and Ridge Analyses*, 2nd ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [37] C. M. Machado, «Empirical Models for Quantification of Machining Damage in Composite Materials», Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2012.
- [38] G. E. P. Box e K. B. Wilson, «On the Experimental Attainment of Optimum Conditions», *Journal of the Royal Statistical Society*, vol. 13, n. 1, pp. 1–45, 1951.
- [39] G. E. P. Box e J. S. Hunter, «Multi-factor experimental designs for exploring response surfaces», *Ann. Math. Statist.*, vol. 28, n. 1, pp. 195–241, 1957.

- [40] «NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods», 2012. [Em linha]. Disponível em: <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>. [Acedido: 21-Fev-2019].
- [41] B. F. P. Faria, «Teste F na Regressão Linear Múltipla para Dados Temporais com Correlação Serial», Dissertação de Mestrado, Universidade Aberta, 2011.
- [42] G. Taguchi, *Introduction to Quality Engineering: Designing Quality into Products and Processes*. Tokyo: Asian Productivity Organization, 1986.
- [43] P. J. Ross, *Taguchi techniques for quality engineering: loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design*, 2nd ed. Singapore: McGraw-Hill Professional, 1995.
- [44] W. Y. Fowlkes e C. M. Creveling, *Engineering methods for robust product design: using Taguchi methods in technology and product development*, 1st ed. Reading: Addison-Wesley Publishing Company, 1995.
- [45] L. Marques, «Análise Experimental da Influência dos Parâmetros de Pressurização na Qualidade de Peças Termoplásticas Produzidas por Injecção», Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2016.









ENGEL ES 1000H/185V SOTR : ENGEL ES 200/30 HL.HIS : ENGEL ES 200/50 HL : ENGEL ES 330/80 HL : ENGEL ES 330H/80V SOTR : ENGEL ES 700H/185V SOTR : ENGEL ES 80/30 HL

Inputs:

- Clamp unit:
- Mould closing speed profile (%/mm)
  - Mould protection: stroke(mm), pressure(bar), end(mm), time act(s), máx. force(kN)
  - Mould height setting(mm)
  - Clamping: force(kN), pressure(bar)
  - Mould opening speed profile (%/mm)
  - Mould opening stroke (mm)

- Air valve:
- Air blowing: start(mm), delay time(s), time act(s)

- Injection:
- Injection speed profile (%/mm)
  - Injection: pressure limit(bar), delay time(s)

- Switchover:
- Switchover: stroke(mm), time act(s), pressure(bar)

- Holding pressure
- Post injection pressure profile (bar/s)
  - Post injection pressure time(s)

- Plasticizing
- Plasticizing speed profile (%/mm)
  - Plasticizing: stroke(mm), delay time(s)
  - Back pressure(bar)
  - Decompression: stroke before plast.(mm), stroke after plast.(mm), speed(%)

- Injection unit:
- Nozzle: forward speed (%), contact pressure(bar), contact pressure build up time(s), return delay time(s), speed backward(%), stroke (mm), holding pressure at demoulding(bar)
  - Start second nozzle speed position (mm)

- Ejector:
- Ejector: rear(mm), stroke(mm), shake position(mm), speed forward(%), speed return(%), pressure forward(%), pressure return(%), forward delay(s), return delay(s), demoulding time(s), new cycle time(s)
  - Start ejector forward(mm)
  - Start second speed forward position(mm)

- Temperature:
- Traverse(feed section) (°C)
  - Cylinder (°C)
  - Nozzle (°C)
  - Mould (°C)
  - Oil temperature (°C)

- Viscosity measurement:
- Flow number set value(bar)
  - Measuring: start(mm), stop(mm)

Machine/Mould (Máquina/Molde)

Clamp protection type			
Vertical	Horizontal		
Clamp force range(kN)			
300	500	800	1200
		1850	2000
Stroke range(mm)			
25	30	35	55
Switching (H)			
2	1		4
Door			
Yes		No	
Lock time (s)			
Yes		No	
Core return			
Reject Chute		No reject Chute	
Ejector return			
Open Nozzle		Horizontal Nozzle	

Legend:

- Green - Characteristic Properties
- Red - Basic Characteristics
- Blue - Characteristics

ENGEL VC 330/120 Tech : ENGEL IN750H/200

Inputs:

- Clamp unit:
- Mould closing speed profile ( $\frac{mm}{s}$ /mm)
  - Mould protection: stroke(mm), pressure(bar), end(mm), time act(s), máx. force(kN)
  - Mould height setting(mm)
  - Clamping: force(kN), force profile(kN/mm), pressure(bar)
  - Mould opening speed profile ( $\frac{mm}{s}$ /mm)
  - Mould opening stroke (mm)
  - Closed mould position(mm)

- Air valve:
- Air blowing: start(mm), delay time(s), time act(s)

- Injection:
- Injection speed profile ( $\frac{cm^3}{s}$ /cm<sup>3</sup>)
  - Injection: pressure limit(bar)

- Switchover:
- Switchover: stroke(mm), time act(s), pressure(bar)

- Holding pressure
- Post injection pressure profile (bar/s)
  - Post injection pressure time(s)
  - Cooling time(s)

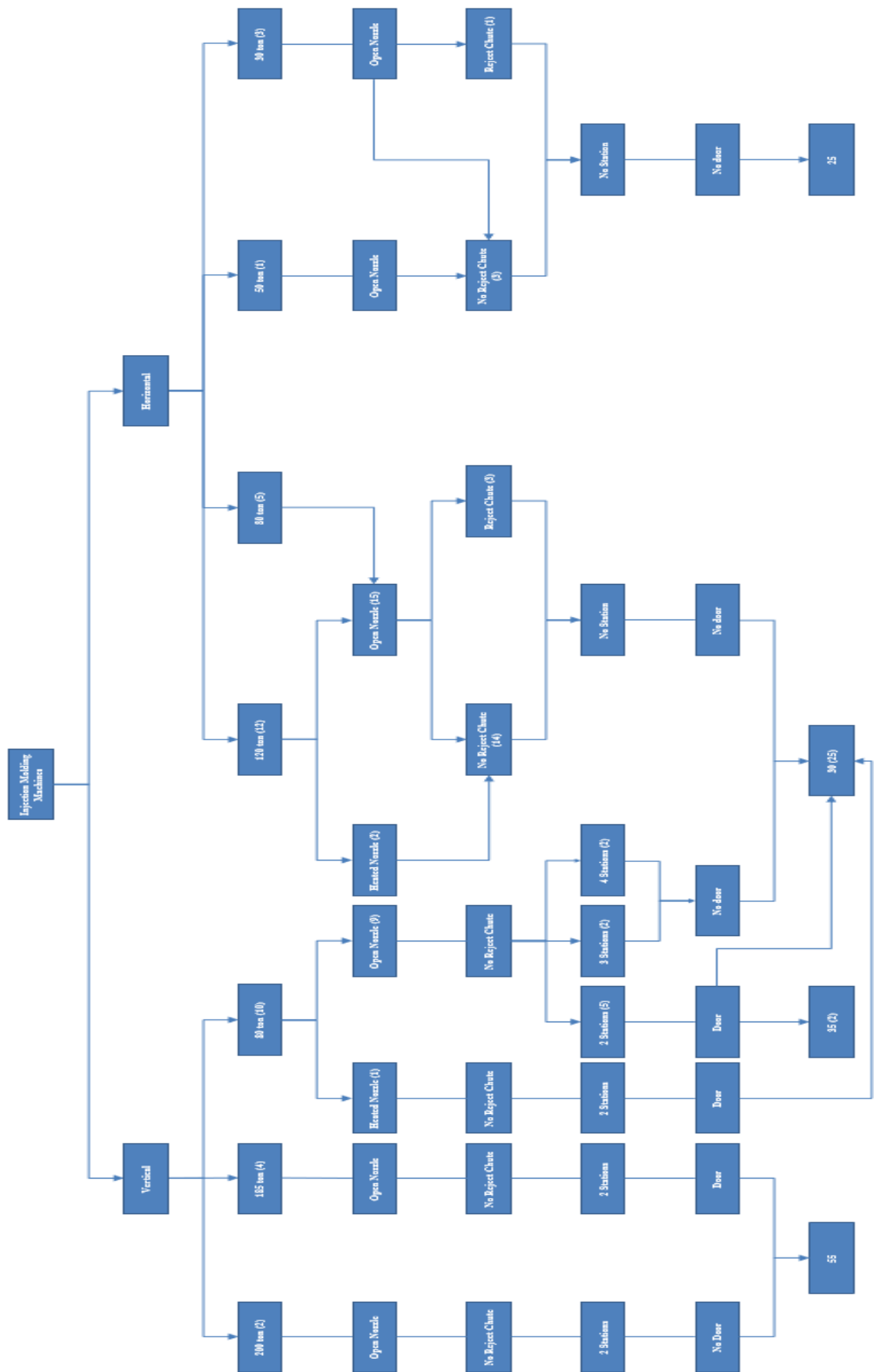
- Plasticizing
- Plasticizing speed profile ( $\frac{cm^3}{s}$ /cm<sup>3</sup>)
  - Plasticizing: stroke(mm), delay time(s), volume(cm<sup>3</sup>)
  - Back pressure profile(bar/cm<sup>3</sup>)
  - Decompression: stroke before plast.(mm), stroke after plast.(mm), speed(%)

- Injection unit:
- Nozzle: forward speed profile ( $\frac{cm^3}{s}$ /mm), return speed profile ( $\frac{cm^3}{s}$ /mm), return stroke(mm), contact force(kN), contact pressure(bar), contact pressure build up time(s), holding pressure at demoulding(bar), demoulding force(kN), return delay(s)

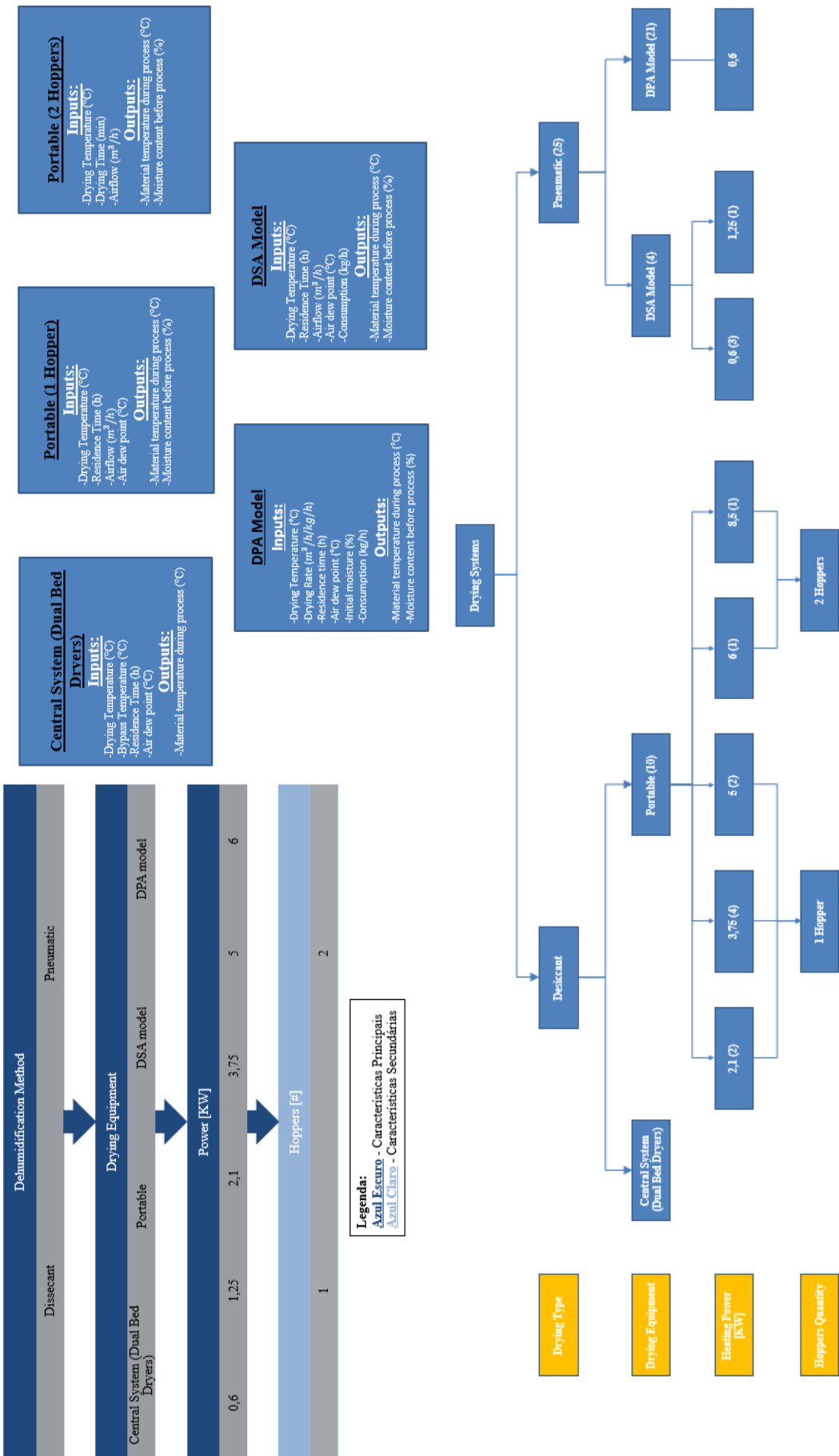
- Ejector:
- Ejector: initial position(mm), rear(mm), stroke(mm), shake position(mm), speed forward profile ( $\frac{mm}{s}$ /mm), speed return profile ( $\frac{mm}{s}$ /mm), force forward profile(kN/mm), force return profile(kN/mm), forward delay(s), return delay(s), end position(mm), pressure forward(bar), pressure return(bar), new cycle time(s)
  - Start ejector forward(mm)

- Temperature:
- Nozzle
  - Cylinder
  - Mould
  - Traverse(feed section)
  - Oil temperature

- Viscosity measurement:
- Flow number set value(bar)
  - Measuring: start(mm), stop(mm)



## Dryers (Desumidificadores)



**Brand Selection:** HB-THERM, PIOVAN, WITTMANN, TOOL-TEMP

**Maximum Heating Temperature [°C]:**

- 60: HB-THERM 60, WITTMANN 60, TOOL-TEMP 60
- 90: HB-THERM 90, WITTMANN 90, TOOL-TEMP 90
- 120: HB-THERM 120, WITTMANN 120, TOOL-TEMP 120
- 160: HB-THERM 160, WITTMANN 160, TOOL-TEMP 160

**Heating Power [kW]:**

- 6: HB-THERM 6, WITTMANN 6, TOOL-TEMP 6
- 9: HB-THERM 9, WITTMANN 9, TOOL-TEMP 9
- 12: HB-THERM 12, WITTMANN 12, TOOL-TEMP 12
- 16: HB-THERM 16, WITTMANN 16, TOOL-TEMP 16

**Maximum Pump Flow Rate [L/min]:**

- 40: HB-THERM 40, WITTMANN 40, TOOL-TEMP 40
- 50: HB-THERM 50, WITTMANN 50, TOOL-TEMP 50
- 60: HB-THERM 60, WITTMANN 60, TOOL-TEMP 60
- 100: HB-THERM 100, WITTMANN 100, TOOL-TEMP 100

**Temperature Control Units:**

- Yes: HB-THERM 100, WITTMANN 100, TOOL-TEMP 100
- No: HB-THERM 50, WITTMANN 50, TOOL-TEMP 50

**Final Pump Models:**

- HB-THERM: 60, 90, 120, 160, 40, 50, 60, 100
- PIOVAN: 60, 90, 120, 160, 40, 50, 60, 100
- WITTMANN: 60, 90, 120, 160, 40, 50, 60, 100
- TOOL-TEMP: 60, 90, 120, 160, 40, 50, 60, 100

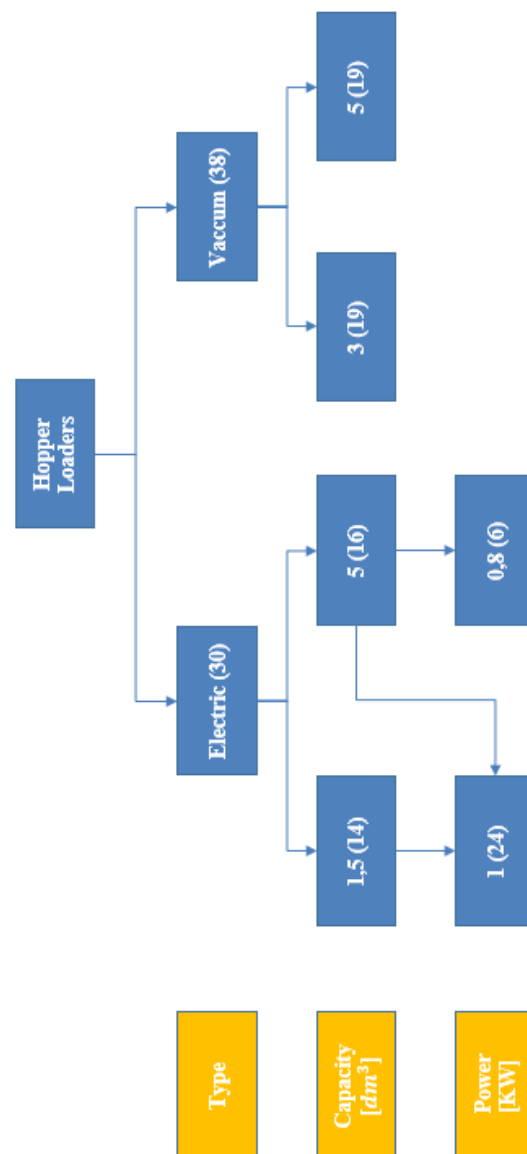
## Hopper Loaders (Alimentadores)

Type		
Electric	Vaccum	
1,5	3	5
0,8		1

<u>Electric Hopper Loaders</u>
<u>Inputs:</u>
- Loading time (s)
- Idle time (s)
- Compressed air consumption (NI/cycle)
- Compressed air pressure (bar)
<u>Outputs:</u>
- Flow of material conveyed (kg/h)
- Transport/Reaching distance (m)

<u>Vaccum Hopper Loaders</u>
<u>Inputs:</u>
- Conveying time (s)
- Pause time between loading cycles (s)
- Compressed air consumption (NI/cycle)
- Compressed air pressure (bar)
<u>Outputs:</u>
- Flow of material conveyed (kg/h)
- Transport/Reaching distance (m)

**Nota:**  
 Loading time = Conveying time  
 Idle time = Pause time between loading cycles











Processo
RESPONSÁVEL
DATA ATUALIZAÇÃO

Máquina		Plástico	
DESIGNAÇÃO		CLASSE	M-SPEC

Peça
PART NAME
PART NUMBER
PRODUTO

Malde	

PARÂMETROS DE AFINAÇÃO (Inputs)		UNIDADE DE REGULAÇÃO		UNIDADE DE MEDIÇÃO		UNIDADE DE CONTROLE	
ALTURA MOLDE	(mm)						
FORÇA FECHO	(kg)						
CURSO ABERTURA	A						
1ª VEL./1º POS.	V1/S1						
2ª VEL./2º POS.	V2/S2						
3ª VEL./3ª POS.	V3/S3						
4ª VEL./4ª POS.	V4/S4						
5ª VEL./5ª POS.	V5/S5						
PRESSIONAMENTO	P1						
CURSO PROTEÇÃO	G1						
PRESSIONAMENTO	P2/P2a						
FIM PROTEÇÃO	(mm)						
TEMPO PROTEÇÃO	T2						
FLUXO	N.A.						
INÍCIO	A2						
TEMPO PAUSA	Z1/V1						
TEMPO SÓRPO	Z11						
1ª VEL./1º POS.	V1/S1						
2ª VEL./2º POS.	V2/S2						
3ª VEL./3ª POS.	V3/S3						
4ª VEL./4ª POS.	V4/S4						
5ª VEL./5ª POS.	V5/S5						
PRESS. INZ. ALIMENTADA	N.A.						
PERFIL VELOCIDADE INTEÇÃO	%						
PRESSIONAMENTO	P6						
MODO COMUTUAÇÃO	C1/P1/P2						
CURSO COMUTUAÇÃO	C3						
COMUTUAÇÃO	Z1						
PRESSIONAMENTO	P4						
PERFIL PÓS-PRESSÃO	(bar)						
TEMPO PÓS-PRESSÃO	Z2						
TEMPO ARREFECIMENTO	Z4						
CURSO DO FUSO	C1						
PERFIL VELOCIDADE DOSAGEM	%						
CONTRA-PRESSÃO	bar						
PAUSA PARA DOSAGEM	Z3						
DESCOMPRESSÃO ANTES	Z4						
DESCOMPRESSÃO DEPOIS	C2						
VELOCIDADE DESCOMP.	V24						
TEMPERATURA	(°C)						
CAUDAL	(kg/Hr)						
PÓS-PRESSÃO	(bar)						

SINTOMA	GUIA DE AFINAÇÃO AÇÃO				
Instruções Especiais de Amonque					

VALORES DE CONTROLO (Outputs)					
	MÍN.	MÁX.		MÍN.	MÁX.
<b>CILINDRO</b>  TEMPERATURA	TEMP BICO	H <sub>10x</sub> (°C)			
	2º TEMP CILINDRO	H <sub>2x</sub> (°C)		TEMPO DE CILDO	Z <sub>2x</sub> (sec)
	3º TEMP CILINDRO	H <sub>3x</sub> (°C)		TEMPO DE ARREFECIMENTO	Z <sub>4x</sub> (sec)
	4º TEMP CILINDRO	H <sub>4x</sub> (°C)		TEMPO DE INJEÇÃO	Z <sub>5x</sub> (sec)
	5º TEMP CILINDRO	H <sub>5x</sub> (°C)		TEMPO DE PÓS PRESSÃO	Z <sub>2x</sub> (sec)
	6º TEMP CILINDRO	H <sub>6x</sub> (°C)		TEMPO DE DOSAGEM	ZD <sub>2x</sub> (sec)
	1º TEMP MOLDE	H7x (°C)		PRESSÃO COMUTACÃO	P <sub>10</sub> (bar)
	2º TEMP MOLDE	H8x (°C)		PÍCO DE PRESSÃO INI.	P <sub>1x</sub> (bar)
<b>MOLDE</b>	3º TEMP MOLDE	H9x (°C)		PÓS-PRESSÃO	(Bar)
	4º TEMP MOLDE	H10x (°C)		PRESSÃO	FZ <sub>x</sub> (bar)
	5º TEMP MOLDE	H11x (°C)		VERIFICAÇÃO	(Av/Rac)
	6º TEMP MOLDE	H12x (°C)		#1 TEMPERATURA	(°C)
	7º TEMP MOLDE	H13x (°C)		CAUDAL	(l/min)
	CURSO TOTAL DOSAGEM	S5x (mm)		VERIFICAÇÃO	(Av/Rac)
	POSICÃO REAL COMUT.	C3x (mm)		#2 TEMPERATURA	(°C)
	ALARGADA	G7x (mm)		CAUDAL	(l/min)
				TEMPERATURA	(°C)
<b>Cabo</b>				CAUDAL	(kg/H)
				PRESSÃO	(Bar)



## Anexo C – Nova folha de *setup* máquinas antigas (Frente)

---







## Anexo D – Nova folha de *setup* máquinas recentes (Frente)

---





PARÂMETROS DE CONTROLO (OUTPUTS)									
	Unid./Par.	Mín.	Máx.						Máx.
Cilindro	3ª Temp. [300] [H14]	°C							
	2ª Temp. [Cilindro] [H10]	°C							
	1ª Temp. [Cilindro] [H10]	°C							
	4ª Temp. [Cilindro] [H16]	°C							
	5ª Temp. [Cilindro] [H16]	°C							
	6ª Temp. [Alum. Alum. Mat.] [H16]	°C							
Molde	3ª Temp. Molde [H7]	°C							
	2ª Temp. Molde [H7]	°C							
	1ª Temp. Molde [H7]	°C							
	4ª Temp. Molde [H12a]	°C							
	5ª Temp. Molde [H12a]	°C							
	6ª Temp. Molde [H12a]	°C							
M14	Temp. Oleo [H12b]	°C							
	Quem Tera Dosagem [50]	mm							
CURSOS	Posição Real Comutação [C1u]	mm							
	Alinhada [C7u]	mm							
PRESSÕES	Volum. Dosagem [H2a]	mm							
	Press. de pressão de injeção [P1u]	bar							
CURSOS	Posição de comutação [H1u]	mm							
	Quem Tera Dosagem [50]	mm							

ESQUEMA DE LIGAÇÕES DO MOLDE



Anexo E – Nova folha *setup* máquinas antigas e recentes  
(Verso)

---



RESULTADOS DE VALIDAÇÃO																																																																																																																	
1. TESTE DE VISCOSIDADE						5. JANELA DE PROCESSO																																																																																																											
<table border="1"> <tr> <th>ID Fluxo</th> <th>Vel. Inj. [mm/s]</th> <th>Pico Pres. Hidráulica [bar]</th> <th>Tempo enchim. [s]</th> <th>Viscosidade [bar.s]</th> </tr> <tr><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>5</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>6</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>7</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>8</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>9</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>10</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>						ID Fluxo	Vel. Inj. [mm/s]	Pico Pres. Hidráulica [bar]	Tempo enchim. [s]	Viscosidade [bar.s]	1					2					3					4					5					6					7					8					9					10					<table border="1"> <tr> <th>Temperatura Material [°C]</th> <th>Pós Pressão [bar]</th> <th>Tempo pós-pres. [s]</th> <th>Observações</th> </tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>						Temperatura Material [°C]	Pós Pressão [bar]	Tempo pós-pres. [s]	Observações																																											
ID Fluxo	Vel. Inj. [mm/s]	Pico Pres. Hidráulica [bar]	Tempo enchim. [s]	Viscosidade [bar.s]																																																																																																													
1																																																																																																																	
2																																																																																																																	
3																																																																																																																	
4																																																																																																																	
5																																																																																																																	
6																																																																																																																	
7																																																																																																																	
8																																																																																																																	
9																																																																																																																	
10																																																																																																																	
Temperatura Material [°C]	Pós Pressão [bar]	Tempo pós-pres. [s]	Observações																																																																																																														
2. BALANCEAMENTO DE CAVIDADES						6. SOLIDIFICAÇÃO PONTO INIEÇÃO (GATE SEAL)																																																																																																											
<table border="1"> <tr> <th>ID Cav. [#]</th> <th>No. Teste [#]</th> <th>Peso Peças [g]</th> <th>25%</th> <th>50%</th> <th>75%</th> <th>95%</th> </tr> <tr><td rowspan="5">1</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>5</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td rowspan="5">2</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>5</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>						ID Cav. [#]	No. Teste [#]	Peso Peças [g]	25%	50%	75%	95%	1	1						2						3						4						5						2	1						2						3						4						5						<table border="1"> <tr> <th>Tempo Pós-presão [s]</th> <th>Peso Peças Cav. #1 [g]</th> <th>Peso Peças Cav. #2 [g]</th> </tr> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> </table>						Tempo Pós-presão [s]	Peso Peças Cav. #1 [g]	Peso Peças Cav. #2 [g]																														
ID Cav. [#]	No. Teste [#]	Peso Peças [g]	25%	50%	75%	95%																																																																																																											
1	1																																																																																																																
	2																																																																																																																
	3																																																																																																																
	4																																																																																																																
	5																																																																																																																
2	1																																																																																																																
	2																																																																																																																
	3																																																																																																																
	4																																																																																																																
	5																																																																																																																
Tempo Pós-presão [s]	Peso Peças Cav. #1 [g]	Peso Peças Cav. #2 [g]																																																																																																															
3. CAPACIDADE DA BOMBA						7. TEMPO DE ARREFECIMENTO																																																																																																											
<table border="1"> <tr> <th>Pressão bomba [bar]</th> <th>Pico Pres. Hidr. [bar]</th> <th>Tempo Injeção [s]</th> </tr> <tr><td>30</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>40</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>50</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>60</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>70</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>80</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>90</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>100</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>110</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>120</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>130</td><td></td><td></td></tr> </table>						Pressão bomba [bar]	Pico Pres. Hidr. [bar]	Tempo Injeção [s]	30			40			50			60			70			80			90			100			110			120			130			<table border="1"> <tr> <th>Tempo de arrefecimento [s]</th> <th>Dimensão [mm]</th> </tr> <tr><td>0</td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> </table>						Tempo de arrefecimento [s]	Dimensão [mm]	0																																																															
Pressão bomba [bar]	Pico Pres. Hidr. [bar]	Tempo Injeção [s]																																																																																																															
30																																																																																																																	
40																																																																																																																	
50																																																																																																																	
60																																																																																																																	
70																																																																																																																	
80																																																																																																																	
90																																																																																																																	
100																																																																																																																	
110																																																																																																																	
120																																																																																																																	
130																																																																																																																	
Tempo de arrefecimento [s]	Dimensão [mm]																																																																																																																
0																																																																																																																	
4. QUEDA DE PRESSÃO						GRÁFICO INIEÇÃO																																																																																																											
<table border="1"> <tr> <th>Pressão Hidráulica Máxima [bar]</th> <th>% Máximo</th> <th>ΔP [bar]</th> </tr> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td></tr> </table>						Pressão Hidráulica Máxima [bar]	% Máximo	ΔP [bar]																															<table border="1"> <tr> <th>Pressão Específica Inieção</th> <th>IL real = ; IL teórico =</th> </tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td></tr> </table>						Pressão Específica Inieção	IL real = ; IL teórico =																																																																			
Pressão Hidráulica Máxima [bar]	% Máximo	ΔP [bar]																																																																																																															
Pressão Específica Inieção	IL real = ; IL teórico =																																																																																																																
CONTROLO ESTATÍSTICO DO PROCESSO						GUIA DE RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS																																																																																																											
<table border="1"> <tr> <th>Capacidade do Processo: Análise VSA</th> <th>Capacidade do Processo: Análise 25x</th> <th>Capacidade do Processo: Análise PVs</th> <th>Capacidade do Processo: Análise CPs</th> <th>Capacidade do Processo: Análise 55x</th> </tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>						Capacidade do Processo: Análise VSA	Capacidade do Processo: Análise 25x	Capacidade do Processo: Análise PVs	Capacidade do Processo: Análise CPs	Capacidade do Processo: Análise 55x																					<table border="1"> <tr> <th>PROBLEMA</th> <th>RESOLUÇÃO</th> <th>PROBLEMA</th> <th>RESOLUÇÃO</th> </tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>						PROBLEMA	RESOLUÇÃO	PROBLEMA	RESOLUÇÃO																																																																									
Capacidade do Processo: Análise VSA	Capacidade do Processo: Análise 25x	Capacidade do Processo: Análise PVs	Capacidade do Processo: Análise CPs	Capacidade do Processo: Análise 55x																																																																																																													
PROBLEMA	RESOLUÇÃO	PROBLEMA	RESOLUÇÃO																																																																																																														



## Anexo F – Características técnicas da máquina injetora

Unidade de fecho	
Força de fecho [kN]	1200
Curso de abertura [mm]	506
Altura regulável do molde [mm]	300
Tamanho das placas porta molde (hor. x vert.) [mm]	740 x 680
Distância máxima entre placas porta molde [mm]	800
Peso máximo do molde [kg]	825
Curso do extrator [mm]	130
Força do extrator [kN]	39,8
Unidade de injeção	
Diâmetro do fuso [mm]	30
Curso do fuso [mm]	160
Volume de injeção máximo [cm <sup>3</sup> ]	113
Velocidade máxima de rotação do fuso [rpm]	400
Razão L/D do fuso	23,6
Taxa de recuperação [g/s]	14
Caudal de injeção [cm <sup>3</sup> /s]	111
Caudal de injeção (aumentado) [cm <sup>3</sup> /s]	82
Pressão de injeção [bar]	2185
Pressão de injeção (aumentada) [bar]	2385
Curso do bico do fuso [mm]	300
Força de encosto do bico [kN]	48,9
Zonas de aquecimento (incl. bico)	4
Outros	
Potência de acionamento da bomba [kW]	15
Potência de aquecimento [kW]	9,2
Capacidade do reservatório de óleo [L]	300





## Anexo G – Propriedades do material

General information	Value	Unit	Test Standard
Resin Identification	PET-(GS+GF)36	-	ISO 1043
Part Marking Code	PET-(GS+GF)36	-	ISO 11469
Rheological properties	Value	Unit	Test Standard
Moulding shrinkage, parallel	0.3	%	ISO 294-4, 2577
Moulding shrinkage, normal	0.7	%	ISO 294-4, 2577
Mechanical properties	Value	Unit	Test Standard
Tensile Modulus	11200	MPa	ISO 527-1/-2
Stress at break	120	MPa	ISO 527-1/-2
Strain at break	2	%	ISO 527-1/-2
Charpy impact strength, 23°C	20	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179/1eU
Charpy notched impact strength, 23°C	5	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179/1eA
Izod notched impact strength, 23°C	3.8	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 180/1A
Thermal properties	Value	Unit	Test Standard
Melting temperature, 10°C/min	247	°C	ISO 11357-1/-3
Temp. of deflection under load, 1.8 MPa	205	°C	ISO 75-1/-2
Coeff. of linear therm. expansion, parallel	20	E-6/K	ISO 11359-1/-2
Coeff. of linear therm. expansion, normal	40	E-6/K	ISO 11359-1/-2
Flammability	Value	Unit	Test Standard
Glow Wire Flammability Index, 3mm	850	°C	IEC 60695-2-12
Glow Wire Ignition Temperature, 3mm	725	°C	IEC 60695-2-13
FMVSS Class	B	-	ISO 3795 (FMVSS 302)
Burning rate, Thickness 1 mm	<100	mm/min	ISO 3795 (FMVSS 302)
Electrical properties	Value	Unit	Test Standard
Relative permittivity			IEC 60250
100Hz	4.2	-	
1MHz	3.8	-	
Dissipation factor			IEC 60250
100Hz	27	E-4	
1MHz	136	E-4	
Volume resistivity	>1E13	Ohm*m	IEC 60093
Surface resistivity	1E14	Ohm	IEC 60093
Electric strength	41	kV/mm	IEC 60243-1
Comparative tracking index	225	-	IEC 60112
Other properties	Value	Unit	Test Standard
Density	1630	kg/m <sup>3</sup>	ISO 1183
Injection	Value	Unit	Test Standard
Drying Recommended	yes	-	-
Drying Temperature	120	°C	-
Drying Time, Dehumidified Dryer	4 - 6	h	-
Processing Moisture Content	≤0.02 <sup>[1]</sup>	%	-
Melt Temperature Optimum	285	°C	-
Min. melt temperature	270	°C	-
Max. melt temperature	290	°C	-
Max. screw tangential speed	0.2	m/s	-
Mold Temperature Optimum	140	°C	-
Min. mould temperature	120	°C	-
Max. mould temperature	140 <sup>[2]</sup>	°C	-
Hold pressure range	≥80	MPa	-
Hold pressure time	4	s/mm	-
Back pressure	As low as possible	-	-
Ejection temperature	170	°C	-

1: At levels above 0.02%, strength and toughness will decrease, even though parts may not exhibit surface defects. 2: (6mm - 1mm thickness)

### Characteristics

Processing

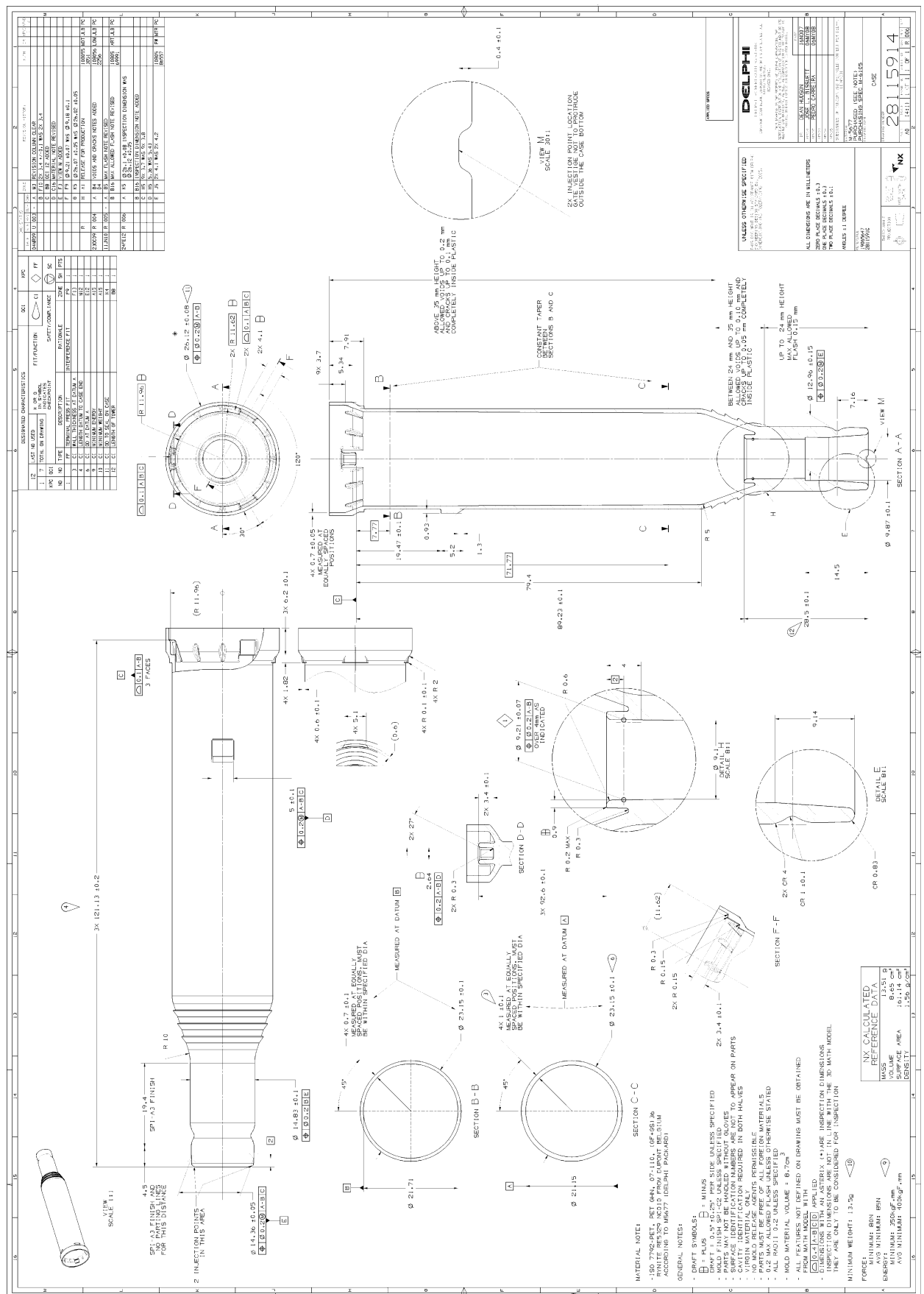
• Injection Moulding



## Anexo H – Desenho técnico *Case N55*

---







## Anexo I – Medições da *CMM* e massa das peças (DOE)

---





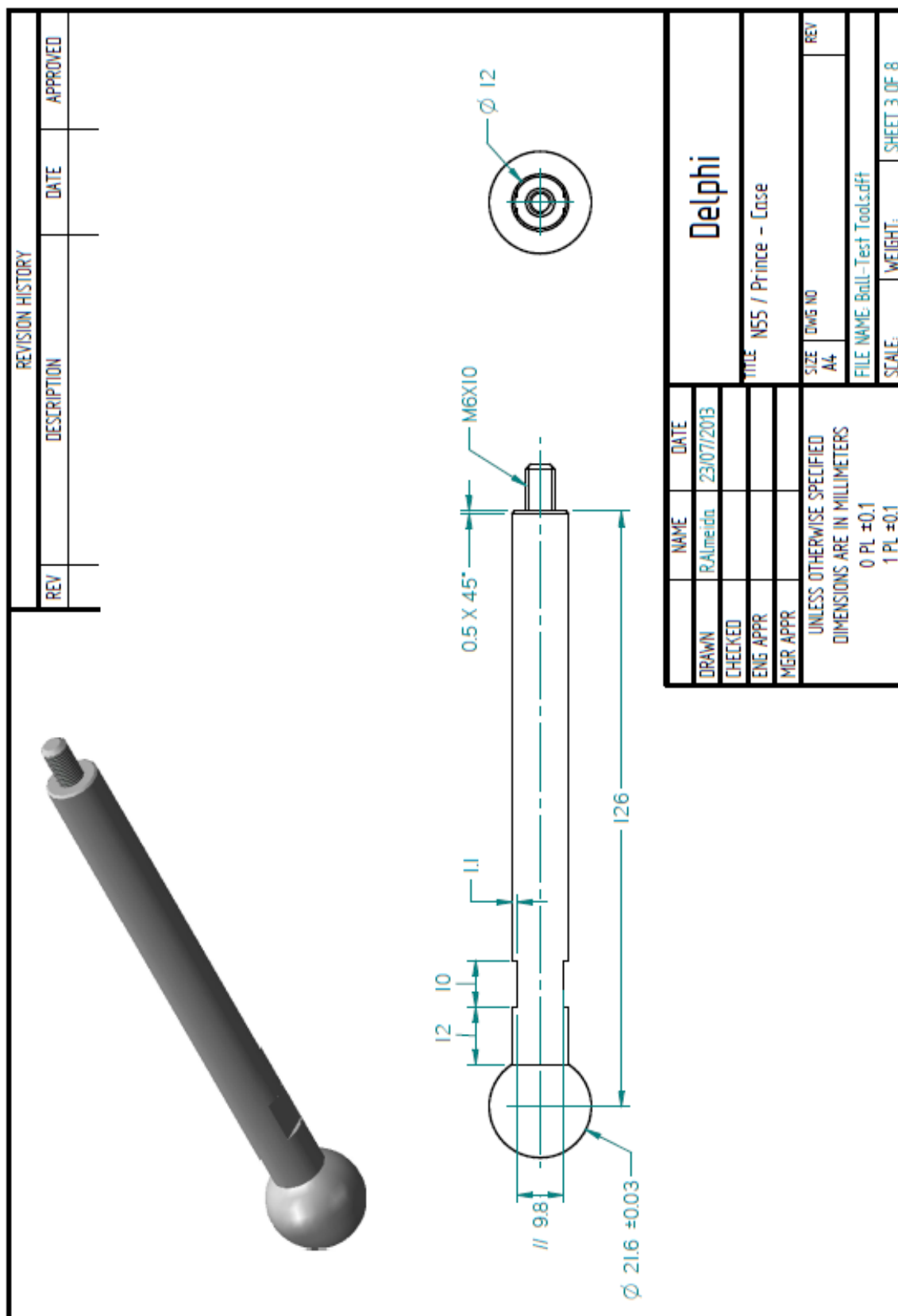
Cavidade	Peça	KPC 1 [mm]	QCI 3_1 [mm]	QCI 3_2 [mm]	QCI 3_3 [mm]	QCI 3_4 [mm]	QCI 3 MÉDIA [mm]	QCI 4 [mm]	QCI 6 [mm]	QCI 10 [g]	QCI 11 [mm]	QCI 12 [mm]
Cav. 12	P 1.1	9,1995	1,0205	0,8900	0,9609	1,0436	0,97874	121,2073	23,1513	13,8291	26,1084	28,8599
	P 1.2	9,9561	1,0161	0,8953	0,9664	1,0376	0,97883	121,1763	23,1523	13,3367	26,1189	27,8233
	P 1.3	9,1893	1,0161	0,9008	0,9682	1,0331	0,97956	121,2064	23,1549	13,8543	26,1383	28,4543
	P 2.1	9,1977	1,0206	0,8878	0,9598	1,0453	0,97838	121,1819	23,1520	13,8164	26,1427	28,4844
	P 2.2	9,1945	1,0172	0,8928	0,9636	1,0380	0,97790	121,1840	23,1528	13,813	26,1204	28,5053
	P 2.3	9,1982	1,0174	0,8974	0,9635	1,0338	0,97802	121,1772	23,1538	13,8133	26,1473	28,4815
	P 3.1	9,1978	1,0264	0,8932	0,9647	1,0471	0,98286	121,2135	23,1694	13,8749	26,2680	28,5737
	P 3.2	9,2040	1,0201	0,8975	0,9691	1,0442	0,98271	121,2045	23,1665	13,8745	26,1649	29,0276
	P 3.3	9,1983	1,0211	0,8996	0,9729	1,0404	0,98347	121,2119	23,1677	13,8797	26,1239	28,8633
	P 4.1	9,1982	1,0260	0,8950	0,9670	1,0455	0,98336	121,2076	23,1697	13,876	26,1357	28,5762
	P 4.2	9,2040	1,0201	0,8975	0,9691	1,0442	0,98271	121,2045	23,1665	13,8772	26,1649	29,0276
	P 4.3	9,1975	1,0214	0,9007	0,9690	1,0403	0,98284	121,2010	23,1684	13,8791	26,1269	28,4965
	P 5.1	9,1942	1,0220	0,8935	0,9638	1,0450	0,98108	121,2023	23,1599	13,832	26,1243	28,8176
	P 5.2	9,2029	1,0192	0,8979	0,9670	1,0371	0,98028	121,2049	23,1600	13,8307	26,2195	29,0724
	P 5.3	9,2063	1,0173	0,8985	0,9667	1,0392	0,98041	121,2015	23,1591	13,8475	26,1299	27,8791
	P 6.1	9,2018	1,0212	0,8929	0,9625	1,0436	0,98004	121,1983	23,1599	13,8355	26,3731	28,4632
	P 6.2	9,1998	1,0173	0,8966	0,9683	1,0380	0,98004	121,1738	23,1588	13,8376	26,1357	28,4605
	P 6.3	9,2023	1,0171	0,8965	0,9695	1,0392	0,98057	121,1932	23,1591	13,8333	26,1188	28,4666
	P 7.1	9,1888	1,0180	0,8889	0,9593	1,0404	0,97663	121,1878	23,1495	13,7719	26,1170	28,6384
	P 7.2	9,1894	1,0170	0,8950	0,9641	1,0363	0,97809	121,1865	23,1507	13,7752	26,1558	28,6497
	P 7.3	9,1927	1,0156	0,8934	0,9614	1,0339	0,97608	121,1715	23,1472	13,7702	26,1492	28,6378
	P 8.1	9,1925	1,0232	0,8954	0,9660	1,0494	0,98350	121,2150	23,1671	13,8899	26,2084	28,5730
	P 8.2	9,1955	1,0218	0,8995	0,9703	1,0416	0,98331	121,2047	23,1694	13,8925	26,1341	28,5667
	P 8.3	9,1940	1,0227	0,8995	0,9706	1,0435	0,98406	121,2030	23,1697	13,8876	26,1272	28,5640
	P 9.1	9,1929	1,0199	0,8949	0,9659	1,0426	0,98083	121,1881	23,1610	13,8382	26,1198	28,6063
	P 9.2	9,1926	1,0202	0,8948	0,9668	1,0403	0,98051	121,1860	23,1599	13,8376	26,2666	28,6072
	P 9.3	9,1968	1,0190	0,8979	0,9669	1,0402	0,98101	121,1946	23,1612	13,8363	26,1768	28,6593
	P 10.1	9,1919	1,0203	0,8911	0,9660	1,0433	0,98016	121,1888	23,1603	13,83	26,1142	28,5971
	P 10.2	9,2036	1,0193	0,8983	0,9682	1,0404	0,98153	121,1677	23,1619	13,8278	26,1204	28,9977
	P 10.3	9,1968	1,0190	0,8979	0,9669	1,0402	0,98101	121,1946	23,1612	13,8326	26,1768	28,6593
	P 11.1	9,1930	1,0181	0,8939	0,9667	1,0436	0,98035	121,1975	23,1596	13,8331	26,1269	28,5728
	P 11.2	9,1425	1,0183	0,9090	0,9722	1,0423	0,98546	121,2942	23,1614	13,8298	26,3139	28,5955
	P 11.3	9,1922	1,0183	0,8976	0,9656	1,0373	0,97971	121,2090	23,1597	13,8313	26,1296	28,5968
	P 12.1	9,1931	1,0174	0,8921	0,9679	1,0435	0,98022	121,1796	23,1597	13,8343	26,1255	28,6133
	P 12.2	9,1923	1,0195	0,8966	0,9668	1,0400	0,98072	121,1911	23,1609	13,8368	26,1141	28,6254
	P 12.3	9,1914	1,0204	0,8979	0,9663	1,0408	0,98136	121,1847	23,1625	13,8303	26,2467	28,5935
	P 13.1	9,1922	1,0178	0,8923	0,9655	1,0436	0,97979	121,1865	23,1599	13,8279	26,1215	28,5756
	P 13.2	9,1954	1,0187	0,8965	0,9674	1,0413	0,98098	121,1926	23,1613	13,8355	26,1165	28,6563
	P 13.3	9,1940	1,0220	0,8944	0,9651	1,0442	0,98142	121,1885	23,1631	13,8342	26,2064	28,6526

Cavidade	Peça	KPC 1 [mm]	QCI 3.1 [mm]	QCI 3.2 [mm]	QCI 3.3 [mm]	QCI 3.4 [mm]	QCI 3 MÉDIA [mm]	QCI 4 [mm]	QCI 6 [mm]	QCI 10 [g]	QCI 11 [mm]	QCI 12 [mm]
Cav 13	P 1.1	9,2001	1,0398	0,9530	0,9306	0,9903	0,97841	121,1463	23,1561	13,8029	26,1150	28,8645
	P 1.2	9,1939	1,0358	0,9583	0,9335	0,9845	0,97803	121,1547	23,1563	13,8071	26,1164	30,9125
	P 1.3	9,19637	1,0413	0,9678	0,9374	0,9906	0,98428	121,1598	23,1678	13,8304	26,1660	27,7208
	P 2.1	9,2009	1,0410	0,9517	0,9298	0,9891	0,97789	121,1525	23,1567	13,7898	26,1168	28,4441
	P 2.2	9,2002	1,0386	0,9573	0,9328	0,9845	0,97828	121,1553	23,1567	13,7864	26,1244	28,4500
	P 2.3	9,2010	1,0382	0,9592	0,9345	0,9849	0,97920	121,1607	23,1594	13,7872	26,1224	28,4594
	P 3.1	9,2020	1,0445	0,9592	0,9345	0,9918	0,98249	121,1593	23,1711	13,846	26,1160	28,4661
	P 3.2	9,2011	1,0400	0,9626	0,9372	0,9867	0,98162	121,1684	23,1657	13,8464	26,1382	28,8409
	P 3.3	9,2007	1,0411	0,9670	0,9390	0,9850	0,98302	121,1707	23,1726	13,8495	26,1232	28,8395
	P 4.1	9,2020	1,0442	0,9603	0,9353	0,9880	0,98197	121,1668	23,1699	13,8464	26,1018	28,4659
	P 4.2	9,2019	1,0422	0,9616	0,9361	0,9873	0,98179	121,1564	23,1671	13,8475	26,1243	28,4571
	P 4.3	9,2018	1,0403	0,9633	0,9397	0,9846	0,98246	121,1668	23,1701	13,8474	26,1233	28,4680
	P 5.1	9,2027	1,0410	0,9570	0,9335	0,9869	0,97959	121,1489	23,1618	13,8048	26,1235	29,0182
	P 5.2	9,2005	1,0412	0,9617	0,9342	0,9883	0,98136	121,1592	23,1637	13,8033	26,2010	28,9816
	P 5.3	9,2053	1,0401	0,9642	0,9357	0,9808	0,98019	121,1698	23,1589	13,8024	26,1253	29,0663
	P 6.1	9,2012	1,0415	0,9591	0,9329	0,9864	0,97999	121,1637	23,1623	13,803	26,2289	28,4239
	P 6.2	9,2016	1,0438	0,9509	0,9245	0,9993	0,97963	121,1560	23,1607	13,8058	26,1263	28,4182
	P 6.3	9,2014	1,0428	0,9633	0,9344	0,9842	0,98168	121,1505	23,1655	13,8015	26,2063	28,4308
	P 7.1	9,1915	1,0380	0,9542	0,9293	0,9841	0,97640	121,1526	23,1500	13,7598	26,1249	28,5561
	P 7.2	9,1921	1,0352	0,9597	0,9312	0,9768	0,97571	121,1316	23,1490	13,7396	26,1354	28,6068
	P 7.3	9,1927	1,0344	0,9613	0,9316	0,9774	0,97620	121,1464	23,1507	13,7413	26,1289	28,5663
	P 8.1	9,1956	1,0441	0,9644	0,9364	0,9882	0,98327	121,1806	23,1721	13,8575	26,3209	28,5693
	P 8.2	9,2004	1,0378	0,9675	0,9403	0,9857	0,98285	121,1754	23,1694	13,8567	26,1241	28,6779
	P 8.3	9,1957	1,0425	0,9633	0,9388	0,9837	0,98256	121,1701	23,1712	13,8556	26,1226	28,5632
	P 9.1	9,1929	1,0411	0,9600	0,9336	0,9875	0,98055	121,1643	23,1636	13,8051	26,1297	28,6350
	P 9.2	9,2003	1,0369	0,9643	0,9359	0,9804	0,97937	121,1489	23,1623	13,8062	26,1243	28,8329
	P 9.3	9,1952	1,0393	0,9633	0,9365	0,9836	0,98117	121,1550	23,1642	13,8029	26,1239	28,5845
	P 10.1	9,1989	1,0392	0,9596	0,9342	0,9851	0,97952	121,1454	23,1607	13,7953	26,1255	28,7795
	P 10.2	9,1964	1,0371	0,9635	0,9360	0,9811	0,97942	121,1624	23,1622	13,7996	26,1239	28,6078
	P 10.3	9,1936	1,0415	0,9636	0,9337	0,9875	0,98158	121,1416	23,1651	13,8035	26,1297	28,6139
	P 11.1	9,1942	1,0376	0,9613	0,9353	0,9873	0,98036	121,1384	23,1626	13,8012	26,1283	28,6411
	P 11.2	9,1960	1,0387	0,9648	0,9354	0,9842	0,98076	121,1603	23,1626	13,8024	26,1154	28,5629
	P 11.3	9,1934	1,0446	0,9613	0,9306	0,9927	0,98230	121,1564	23,1667	13,7998	26,2719	28,5941
	P 12.1	9,1945	1,0380	0,9607	0,9360	0,9839	0,97966	121,1627	23,1598	13,8039	26,1261	28,5418
	P 12.2	9,1966	1,0379	0,9646	0,9381	0,9802	0,98019	121,1410	23,1628	13,8037	26,1341	28,5890
	P 12.3	9,1939	1,0375	0,9634	0,9367	0,9835	0,98028	121,1591	23,1627	13,7993	26,1227	28,6983
	P 13.1	9,1974	1,0382	0,9597	0,9356	0,9882	0,98041	121,1515	23,1624	13,7997	26,1310	28,5568
	P 13.2	9,1942	1,0435	0,9620	0,9324	0,9930	0,98272	121,1543	23,1660	13,8025	26,2396	28,5316
	P 13.3	9,1963	1,0385	0,9620	0,9377	0,9837	0,98047	121,1629	23,1625	13,8007	26,1379	28,5403

## Anexo J – Desenho técnico do punção de *Ball Test*

---







## Anexo K – Programas desenvolvidos em *MATLAB*

---

```
function createfigure(X1, Y1)
%CREATEFIGURE(X1,Y1)
% X1: vector of x data
% Y1: vector of y data

% Create figure
figure1 = figure('Color',[1 1 1]);

% Create axes
axes1 = axes('Parent',figure1,'FontSize',16);
hold(axes1,'all');

% Create plot
plot(X1,Y1,'LineWidth',2,'Color',[0 0.498039215803146 0]);

% Create xlabel
xlabel('Nominal Strain [mm]','FontSize',16);

% Create ylabel
ylabel('Standard Force [N]','FontSize',16);
```

---

```
function Graphs(y)
clc;
%Opens txt file
gslib_file_name=input('Enter the gslib file name: ','s');

%Reads data from txt file
data=load(gslib_file_name);
SF=data(:,1);
NS=data(:,2);

%Max Standard Force
Fmax=max(SF);

%Strain at break
Sb=max(NS);

%Force at break
idx=find(NS==Sb);
Fb=SF(idx);
idx1=find(SF==Fmax);
Smax=NS(idx1);

%Create lines for Fmax and Fb
NSmax=linspace(0,Smax,3000);
SFmax=linspace(-50,Fb,3000);

%Create figure
%createfigure_g - green line
createfigure_g(NS,SF);
hold on;
plot(NS,Fb);
plot(Sb,SFmax);
plot(NSmax,Fmax);
```





# Anexo L – Considerações de processo e notas dos fabricantes

CONSIDERAÇÕES DE PROCESSO E NOTAS DOS FABRICANTES									
PARÂMETROS DE AFINAÇÃO (INPUTS)									
<p>● Para as máquinas com controladores CC200 todos os perfis foram definidos com 5 pontos na Folha de Setup podendo este número ser alterado na máquina (se para tal for necessária a inclusão de mais pontos).</p>									
FECHO DO MOLDE									
<p>● No perfil de velocidades a máquina só permite introduzir 3 velocidades e respectivas posições. [CC100]</p> <p>● Curso de abertura, A (curso mínimo): comprimento da peça + 5mm. [CC100] *</p> <p>● Protecção de molde:</p> <p>Para uma protecção de molde eficaz, ajustar a velocidade tão lenta quanto for possível. [CC100/CC200]</p> <p>Escolher uma força tanto quanto possível pequena devido ao fim do processo do fecho. [CC100/CC200]</p> <p>Ajustar "iniciar monitorização da protecção do molde" em tal posição, a partir da qual pode ocorrer uma avaria do molde, se uma peça injectada ficar presa (por exemplo altura da peça + canal de injeção). A medição do curso de protecção Fim de protecção de molde corresponde à posição do molde fechado. [CC100/CC200]</p> <p>Tempo de protecção deve ser um pouco maior que o tempo realmente necessário para atravessar a área de monitorização. [CC100/CC200]</p> <p>Existem 2 tipos de monitorização (de força e de velocidade) sendo este definido na máquina. Na monitorização de força esta não pode ser superior à curva de referência e no caso da monitorização da velocidade esta não pode ser inferior à Força máxima ajustada = 80% da máxima força de protecção do molde. [CC200]</p> <p>Velocidade mínima ajustada = 0,1 mm/s. [CC200]</p> <p>● Altura do molde, FH: Após a introdução do valor pretendido (input), deve ser ligada a determinação automática da altura do molde. Assim, o molde ficará posicionado onde se pretende, desde que esteja compreendido entre a altura</p>									
ABERTURA DO MOLDE									
<p>● No perfil de velocidades a máquina só permite introduzir 3 velocidades e respectivas posições. [CC100]</p> <p>● Ajustar o movimento de abertura tanto quanto possível com a economia de tempo de ciclo e isento de solavancos. [CC100/CC200]</p>									
INJEÇÃO									
<p>● Perfil da velocidade de injeção: Corresponde à velocidade do fuso durante a injeção. Deve ser reduzida a velocidade de injeção antes de entrar na fase de pós-pressão. Isto irá assegurar um ponto de comutação preciso e repetível.</p> <p>● Pressão de injeção aumentada: No caso de a pressão máxima não ser suficiente, é ligado este modo que permite a máquina alcançar uma pressão de injeção específica maior. Porém, a velocidade de injeção máxima possível é menor.</p> <p>● Limite pressão (específica) injeção, P6: Como ajuste de segurança para o molde, 10% [CC200] ou cerca de 20bar [CC100] acima do valor de pico da pressão de injeção.</p>									
COMUTAÇÃO									
<p>● Modo de comutação: curso (C), tempo (T), pressão (P), em paralelo (PAR) [CC100/CC200]</p> <p>● Pressão de comutação = Pressão hidráulica = PH. Este modo de comutação é utilizado principalmente quando as oscilações de volume são as principais grandezas de interferência. [CC100/CC200]</p> <p>● Comutar em dependência do curso é eficaz quando se tem oscilações na viscosidade e na temperatura. [CC100/CC200]</p> <p>● Curso de comutação = Volume injeção = C3. [CC200]</p> <p>● Campo de comutação: Este campo é ajustado quando ocorrem picos de pressão no início da injeção, ocasionando uma comutação antecipada. Com isso, a máquina comuta para pós-pressão, somente após alcançar este campo.</p>									
PÓS-PRESSÃO									
<p>● Tempo arrefecimento, Z4: Começa depois da pós-pressão e deve ser grande o suficiente para que a dosagem possa ocorrer na totalidade. [CC100/CC200]</p>									
DOSAGEM									
<p>● Descompressão antes, C4: Começa imediatamente após o fim da pós-pressão para aliviar a pressão da massa fundida no canal de aquecimento e cilindro da massa. Este alívio de compressão corresponde ao recuo do fuso. A velocidade é</p> <p>● Descompressão depois, C2: Começa após a dosagem para aliviar a pressão da massa fundida no cilindro e garantir um comportamento de fecho mais uniforme do bloqueio da corrente de retorno durante a injeção. Esta distância é medida</p> <p>● Modo descompressão: Antes da dosagem (A), após a dosagem (D), antes e após a dosagem (A&amp;D). [CC100/CC200]</p> <p>● Velocidade de alívio = Velocidade de descompressão: Deve ser sincronizada (em caso padrão) com a velocidade de movimento de recuo da rosca na dosagem. [CC100/CC200]</p> <p>● Pausa para dosagem = Tempo de atraso para dosagem=Z3: Para materiais termicamente sensíveis a tempos de arrefecimento mais prolongados. Este tempo inicia com o fim da descompressão antes da dosagem. [CC100/CC200]</p> <p>● Volume de dosagem: A almotofada restante necessária no final da pós-pressão deverá ser de aproximadamente 5 a 10% do curso de dosagem. No caso ideal o curso de dosagem deverá estar na faixa entre 1 e 3 diâmetros de rosca. Caso</p>									
UNIDADE DE INJEÇÃO									
<p>● Tempo de formação da força = Tempo de subir pressão = Z5a: Para que uma força de encosto possa ser formada, é necessário um tempo de formação de força de aproximadamente 0,2 até 0,3s. [CC200]</p> <p>● Pressão de encosto do bico, P5: Ajustar de modo a que não ocorra vazamento de material entre o bico e o molde. [CC200] *</p> <p>● Força de manutenção na desmoldagem = Pressão de retenção = P5b: Força efectiva com bico encostado sem força de fecho. [CC200]</p> <p>● Opção recuo bico: 0 - não, 1 - depois da pausa recuo bico (Z6), 2 - antes da abertura do molde. [CC100]</p> <p>● Pressão de retenção, P5b: mínimo = 0, máximo = pressão encosto bico (P5). [CC100]</p> <p>● Curso recuo bico (K): mínimo = início 2ª velocidade avanço (J1). [CC100]</p>									
EXTRACÇÃO									
<p>● Início de avanço, A1: mínimo = curso extrator + 5mm, máximo = A(abertura do molde) [CC100]; A1 = Curso de abertura (A), sempre. [CC200]</p> <p>● Curso do extrator, L1: mínimo = extrator recuado (L). [CC100]</p> <p>● Vibração: Utilizado em peças de difícil desmoldação. [CC100/CC200]</p> <p>● Posição vibração, L2: mínimo = extrator recuado (L), máximo = curso extrator (L1). [CC100]</p> <p>● Posição do curso do extrator: A medição é feita a partir da posição mecânica recuada do extrator da máquina. [CC200]</p> <p>● Posição do extrator atrás e na frente: O curso do extrator resulta da diferença da posição do extrator atrás e da posição do extrator na frente. [CC200]</p> <p>● Posição de agitar extrator: O curso do agito é resultado da posição do extrator na frente e da posição de agitar extrator. [CC200] *</p> <p>● Posição fim de ciclo: Recuado = O extrator depois dos agitos; Avançado = O extrator fica à frente até ao início do próximo ciclo (para retirar peças injectadas, por exemplo). [CC100/CC200]</p>									
TEMPERATURAS									
<p>● Nas máquinas com controlador CC200 foram definidas 6 regiões com controlo térmico quer nos moldes, quer nos cilindros enquanto que para as máquinas com o controlador CC100 apenas se controlam 5 regiões.</p> <p>● Na temperatura da zona de entrada de material, é frequente ajustar para 40°C. [CC100/CC200]</p> <p>● As temperaturas inseridas no molde podem ser de aquecimento ou de arrefecimento sendo isto definido na máquina. [CC100]</p>									
SOPRO									
<p>● Função: 0=a válvula de ar está desligada, 1=válvula começa a actuar depois do tempo de pausa(ZLV1) e acaba quando o tempo de sopro(ZL1) terminar(no fecho do molde), 2=válvula começa a actuar depois do tempo de pausa(ZLV1) e acaba</p> <p>● Início sopro, A2: mínimo = 0, máximo = A(abertura de molde). [CC100] *</p>									
FLUIDEZ									
<p>● As posições de medição devem ser definidas para que a monitorização do número de fluxo seja feita 0,2 segundos aproximadamente antes de chegar à posição de comutação (C3). [CC100]</p>									
CONTROLADORES DE TEMPERATURA									
<p>● Ponto de medição interno: medição da temperatura do sensor térmico interno que se pode encontrar na ligação de avanço e de recuo. O ponto de medição escolhido é conduzido ao regulador como valor real. [CC100/CC200]</p>									
DRYERS									
<p>● Se existirem parâmetros que não são adequados ao modelo de Dryer em causa, utilizar N.A. (não aplicado) [CC100]</p> <p>*: Apesar desta nota ser dada para o modelo indicado, não implica que não possa ser utilizada para ambos.</p>									



## Anexo M – Validação N55 Case#6 PLT461

---





RESULTADOS DE VALIDAÇÃO

5. JANELA DE PROCESSO

IR Fusão	10	Tempo pós-pressão	285	Observações	41
Peça		Temperatura Pós-Pressão Molde [°C]			
1	35	140	0	Nok	
2	40	140	10	Nok	
3	45	140	20	Nok	
4	50	140	30	Nok	
5	55	140	40	Nok	
6	60	140	50	Nok	
7	65	140	60	OK	
8	70	140	70	OK	
9	75	140	80	OK	
10	80	140	90	OK	
11	85	140	100	OK	
		140	110	Nok	

GRÁFICO PESO PEÇAS vs TEMPO PÓS-PRESSÃO

RESULTADO

Tempo pós-pressão = 4 s

6. SOLIDIFICAÇÃO PONTO INJEÇÃO (GATE SEAL)

GRÁFICO DIMENSÃO vs TEMPO ARREFEC.

RESULTADO

Tempo arrefecimento = 8 s

7. TEMPO DE ARREFECIMENTO

GRÁFICO DIMENSÃO vs TEMPO ARREFEC.

RESULTADO

Tempo arrefecimento = 8 s

RESULTADOS DE VALIDAÇÃO

1. TESTE DE VISCOSIDADE

Vel. Inj.	Pico Pres.	Tempo Injeção	Viscosidade
[mm/s]	[bar]	[s]	[bar.s]
1	35	93,9	11,17
2	40	92,4	10,5
3	45	92,5	0,94
4	50	93,6	0,85
5	55	93,6	0,78
6	60	95,2	0,72
7	65	95,5	0,66
8	70	95,3	0,62
9	75	95,4	0,59
10	80	96,6	0,57
11	85	97,6	0,56

GRÁFICO VISCOSIDADE vs VEL. INJEÇÃO

Vel. Inj. = 75 mm/s; C1 = 43 mm; C3 = 11 mm; VS = 32 mm

RESULTADOS

2. BALANCEAMENTO DE CAVIDADES

GRÁFICO MÉDIA PESO PEÇAS vs CAVIDADE

RESULTADO

Diferença entre cavidades < 1,6 %

3. CAPACIDADE DA BOMBA

GRÁFICO PRESSÃO BOMBA vs TEMPO INJEÇÃO

RESULTADO

Pressão bomba < 32,6 bar

4. QUEDA DE PRESSÃO

GRÁFICO PERDAS PRESSÃO

RESULTADO

15% - 75% peça = 32,6 bar

5. JANELA DE PROCESSO

Tempo Pós-pressão	285	Observações	41
Peça		Temperatura Pós-Pressão Molde [°C]	
1	35	140	0
2	40	140	10
3	45	140	20
4	50	140	30
5	55	140	40
6	60	140	50
7	65	140	60
8	70	140	70
9	75	140	80
10	80	140	90
11	85	140	100
		140	110

GRÁFICO PESO PEÇAS vs TEMPO PÓS-PRESSÃO

RESULTADO

Tempo pós-pressão = 4 s

6. SOLIDIFICAÇÃO PONTO INJEÇÃO (GATE SEAL)

GRÁFICO DIMENSÃO vs TEMPO ARREFEC.

RESULTADO

Tempo arrefecimento = 8 s

7. TEMPO DE ARREFECIMENTO

GRÁFICO DIMENSÃO vs TEMPO ARREFEC.

RESULTADO

Tempo arrefecimento = 8 s

CONTROLE ESTATÍSTICO DO PROCESSO

Capacidade do Processo: Análise V5x	Capacidade do Processo: Análise 25x	Capacidade do Processo: Análise 55x
Capacidade do Processo: Análise V5x	Capacidade do Processo: Análise 25x	Capacidade do Processo: Análise 55x

GUIA DE RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS

PROBLEMA	RESOLUÇÃO	PROBLEMA	RESOLUÇÃO
Cracks na seção HV	Verificar humidade do material [0,0130;0,019]	Maus enchimentos	Ajustar valor de pós-pressão. Máximo 90 bar
Cracks na seção HV	Pressões de injeção nos limites definidos [70-90] bar	Maus enchimentos	Diminuir temperatura do injetor em patamares [58C] para evitar labilagem de plástico
Cracks na seção HV	Trocar material e garantir nível de humidade	Rebarbas	Ajustar (aumentar) C3 progressivamente em patamares de 1mm para evitar mais enchimentos.
	Ajustar valor de pós-pressão. Mínimo admissível 70 bar		